



Ricardo Manuel Machado dos Santos Mateus

Licenciado em Ciências de
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

**Medição dos Esforços Eletromecânicos
Desenvolvidos em Dispositivos de Potência que
Utilizam Materiais Supercondutores**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientadora: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto,
FCT/UNL

Co-orientador: Mestre Nuno Manuel Gonçalves Vilhena, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2016

Medição dos Esforços Eletromecânicos Desenvolvidos em Dispositivos de Potência que Utilizam Materiais Supercondutores

Copyright © Ricardo Manuel Machado dos Santos Mateus, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Aos meus pais,
À Rita,
À minha família e amigos !*

AGRADECIMENTOS

Com este documento finalizo esta importante fase da minha vida. Durante todo o meu percurso tive a oportunidade de viver várias experiências, momentos e aprendizagens. A todos os que de certa forma tiveram a sua importância, deixo os meus agradecimentos.

Em primeiro lugar, queria agradecer aos meus orientadores, à Professora Anabela Pronto por me ter despertado interesse pela área da energia e supercondutividade durante as suas aulas e pelos ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho. Ao Mestre Nuno Vilhena, que acompanhou o desenvolvimento da minha dissertação, oferecendo um apoio incansável em todas as dificuldades que pudessem surgir.

Ao Professor Rui Igreja, do Departamento de Ciências dos Materiais da FCT, que se mostrou disponível para todo o tipo de dúvidas e esclarecimentos. Agradeço todo o tempo e conhecimento que partilhou comigo, mostrando-se importante na realização deste documento.

No geral, um agradecimento à instituição universitária, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, pelo acolhimento e formação académica concedidos, em particular ao Departamento de Engenharia Electrotécnica.

Aos meus colegas do laboratório de supercondutividade, que estiveram presentes durante a realização desta dissertação, sempre prontos a ajudar e partilhar conhecimentos.

Reservo um agradecimento especial, o mais importante, aos meus pais. Foi por eles que consegui ter a oportunidade de realizar um curso superior. Obrigado por acreditarem em mim, pelo apoio incondicional e pelos ensinamentos, valores e responsabilidades que me inculcaram. Sem vocês, não seria a pessoa que sou hoje. Agradeço-vos pela compreensão e confiança que depositaram em mim. A vocês dedico o final desta etapa. Muito obrigado.

A todos os meus amigos de Sines, que sempre me acompanharam e apoiaram. Ao Francisco Soares, com o qual possuo amizade desde a infância e partilhei casa durante esta jornada. Esteve sempre presente durante todo o meu percurso e a sua amizade ajudou-me a finalizá-lo com sucesso. Aos meus colegas de curso, Hugo de Sousa, Carlos Loura, João Simões, David Fouto e António Bernardino, que apesar de os ter conhecido apenas na faculdade, sei que vão acompanhar o meu futuro e agradeço-lhes por todo o companheirismo, amizade e bons momentos.

À Rita, pela companhia, amizade e amor. Agradeço-te pela pessoa que és, pela paciência e motivação durante estes anos, sei que não foi fácil, mas sem ti, não teria sido o mesmo.

RESUMO

A atual rede de energia elétrica necessita cada vez mais da presença de dispositivos de potência, capazes de responder às necessidades do utilizador. Existe assim, uma especial atenção no controlo e prevenção de falhas na rede elétrica, de modo a que esta opere sem a ocorrência de eventos prejudiciais.

Acompanhando este crescimento, resulta um aumento na complexidade das redes, tendo como consequência um maior número de ocorrências. As correntes de curto-circuito (CC) são uma das principais responsáveis por perturbações na rede. Existe necessidade estudar as consequências destas falhas, permitindo realizar a proteção adequada.

Com a descoberta da supercondutividade um enorme número de investigações foram levadas a cabo por diversos cientistas com o objetivo de descobrir e estudar novas aplicações e metodologias. Este trabalho, tem como objetivo desenvolver um método que permita medir e analisar os esforços electromecânicos desenvolvidos em Limitadores de Corrente de Defeito Supercondutores (LCDS), na ocorrência de falha na rede, de modo a perceber com maior exatidão quais as deformações e tensões a que poderão estar sujeitos, otimizando o seu funcionamento.

Para isso, será desenvolvido um método de medida das tensões mecânicas e realizar-se-ão vários ensaios, com o intuito de analisar e mensurar as deformações presentes nas fitas supercondutoras constituintes do secundário do LCDS, recorrendo para tal à utilização de extensómetros, bem como o circuito eléctrico respetivo para o efeito.

Palavras-chave: Supercondutividade, Fita supecondutora, Limitador de Corrente de Defeito Supercondutor, Esforços electromecânicos, Extensómetros

ABSTRACT

The modern electric power system increasingly requires the presence of reliable power devices, which are capable to respond to customer needs. There is thus a special attention to the maintenance, control and prevention of failures in the electric power system, focusing its operation on avoiding harmful events.

Simultaneously, the number of failures tends to grow due to the increasing complexity of modern electric networks. The short-circuit currents are mainly responsible for network disruption. So, there is a need to study the consequences of those failures in order to perform suitable protection.

To overcome these problems, a huge number of researches were carried out by several scientists in order to discover and study new applications and methodologies, regarding superconductivity. This work aims to develop a method to measure and analyse electromechanical forces in Superconductive Fault Current Limiters (SFCL), under short-circuit conditions, in order to understand more precisely which strains and stresses these devices may be subject and to optimize its operation.

It will be developed a measurement method of mechanical stresses, in order to analyse and measure the strains which superconductive tapes are subjected. The measurement procedure is based on strain gauges devices adapted to work at 77 K, as well as the electric circuit appropriate for this purpose.

Keywords: Superconductivity, Superconductive tape, Superconductive Fault Current Limiter, Electromechanical stresses, Strain gauges

ÍNDICE

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Simbologia	xxiii
Notações	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Contribuições originais	2
1.4 Organização da dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Supercondutividade	5
2.1.1 Enquadramento histórico	5
2.1.2 Propriedades dos materiais supercondutores	6
2.1.2.1 Resistividade Nula	7
2.1.2.2 Efeito Meissner e Supercondutores do Tipo I e II	8
2.1.3 Supercondutores de alta temperatura	10
2.2 LCDS – Limitadores de corrente de defeito supercondutores	13
2.2.1 Introdução	13
2.2.2 Tipos de LCDS	14
2.2.2.1 LCDS Resistivo	15
2.2.2.2 LCDS Indutivo	16
2.2.2.3 LCDS Retificador	19
2.2.3 Conclusão	19
2.3 Esforços eletromecânicos em dispositivos de potência	20
2.3.1 Esforços em enrolamentos de dispositivos de potência	20
2.3.1.1 Forças radiais e sua origem	22
2.3.1.2 Forças axiais e sua origem	26
2.3.2 Outros métodos de medida e previsão de esforços mecânicos	28

2.4	Extensometria	28
2.4.1	Extensômetros e conceitos gerais	29
2.4.1.1	Escolha do extensômetro - Características dos Extensô- metros	32
2.4.1.2	Fontes de erros dos extensômetros	33
2.4.1.3	Ponte de Wheatstone	34
2.4.2	Aplicações em fitas supercondutoras	36
2.4.2.1	Estudos de esforços em fitas supercondutoras 1ª Geração	36
2.4.2.2	Estudos de esforços em fitas supercondutoras 2ª Geração	37
2.4.3	Síntese de capítulo	40
3	Montagem Experimental e Medição de Tensões Mecânicas	41
3.1	Montagem para ensaio do LCDS	42
3.1.1	Dimensionamento do circuito - Resistência de linha e resistência de carga	43
3.1.2	Limitador de corrente de defeito supercondutor	45
3.2	Circuito para aquisição de dados	45
3.2.1	Bloco 1 : Ponte de Wheatsone e amplificação do sinal	46
3.2.1.1	Excitação da ponte DC vs AC	48
3.2.1.2	Resistências e extensômetros - Escolha dos modelos cor- retos	49
3.2.1.3	Amplificador utilizado	52
3.2.2	Bloco 2 : Desmodulação e filtragem do sinal	53
3.2.3	Bloco 3 : Aquisição digital do sinal	54
3.2.4	Fluxograma – Processo de processamento do sinal	56
4	Medição, análise e discussão de resultados	59
4.1	Simulações	59
4.2	Procedimento experimental	61
4.3	Configurações utilizadas para o LCDS	62
4.4	Resultados e análise dos esforços eletromecânicos	63
4.4.1	Ensaio do LCDS para medição de forças axiais/radiais utilizando 1 espira YBCO - Configuração A	64
4.4.2	Ensaio do LCDS para medição de forças axiais utilizando 2 espiras YBCO - Configuração B	66
4.4.3	Ensaio do LCDS para medição de forças radiais utilizando 2 espiras YBCO - Configuração B	68
4.4.4	Ensaio do LCDS para medição de forças axiais/radiais utilizando 1 espira BSCCO - Configuração C	70
4.5	Conclusão	71
5	Conclusões e Trabalho Futuro	73

5.1	Conclusões gerais	73
5.2	Trabalho futuro	74
	Bibliografia	77

LISTA DE FIGURAS

2.1	Heike Kamerlingh Onnes (à direita) and Gerrit Flim, o seu técnico, junto do liquidificador de Hélio, no Laboratório de Leiden, em 1911	6
2.2	Onnes verificou que a resistência cai abruptamente após atingir a temperatura de 4.20 K	7
2.3	Diagrama de fases de um supercondutor	7
2.4	Comparação entre supercondutor e condutor perfeito quando $<T_c$ em campo nulo ou na presença de campo	9
2.5	Comportamento dos supercondutores do tipo I e II	9
2.6	Evolução da temperatura crítica dos materiais supercondutores	10
2.7	Fita 1ª Geração BSCCO (InnoST)	11
2.8	Fita 2ª Geração YBCO (SCS4050 - SuperPower)	11
2.9	Secção recta de fitas supercondutoras	11
2.10	Característica mecânica da fita supercondutora BSCCO	12
2.11	Característica mecânica da fita supercondutora YBCO YBCO SCS4050	13
2.12	Comportamento da corrente na linha com LCDS	14
2.13	Esquema elétrico do LCDS resistivo puro	15
2.14	Esquema elétrico do LCDS indutivo tipo transformador	16
2.15	LCDS trifásico fabricado pela empresa ABB na Suíça	17
2.16	LCDS indutivo instalado na rede elétrica no Sul da Califórnia	18
2.17	Esquema do LCDS indutivo de núcleos saturados utilizado na plataforma eólica	18
2.18	Esquema elétrico do LCDS retificador	19
2.19	Representação esquemática da força de Laplace	21
2.20	Distribuição das linhas de força dos campos de indução magnética em enrolamentos de bobinas concêntricas	22
2.21	Representação em corte transversal de dois enrolamentos concêntricos e respectivas forças radiais	23
2.22	Representação das forças nos enrolamentos de uma bobina concêntrica . . .	24
2.23	Representação das forças presentes na deformação do tipo “forced buckling” .	24
2.24	Danos causados por forças de compressão radial, do tipo “force buckling” . .	24
2.25	Representação das forças presentes na deformação do tipo “free buckling” . .	25
2.26	Danos causados por forças de compressão radial, do tipo “free buckling” . . .	25
2.27	Representação das forças axiais de compressão num transformador	26

2.28	Consequência da assimetria entre enrolamentos	26
2.29	Danos causados por forças de compressão axial, do tipo “ <i>bending</i> ”	27
2.30	Danos causados por forças de compressão axial, do tipo “ <i>tilting</i> ”	27
2.31	Esquema de um extensômetro	29
2.32	Força externa exercida num objeto	30
2.33	Deformação mecânica quando aplicada força de tração	30
2.34	Deformação mecânica quando aplicada força de compressão	30
2.35	Característica mecânica de um material, ilustrando as duas regiões de funcionamento	31
2.36	Diferentes modelos de extensômetros, consoante o objetivo da medição	33
2.37	Representação do circuito ponte de Wheatstone, em que R_{EXT1} representa um extensômetro	34
2.38	Método aplicado utilizando extensômetros	36
2.39	Medição de deformações em fita supercondutora DI-BSCCO, utilizando extensômetros	37
2.40	Mecanismo utilizado para aplicar forças de tração em fitas supercondutoras	38
2.41	Mecanismo utilizado nos ensaios cíclicos de esforços mecânicos em fita supercondutora YBCO	39
2.42	Diferentes métodos para medição de deformações por flexão	39
2.43	Método aplicado para estudo de deformações uniaxiais, de flexão e combinadas	40
3.1	Circuito de potência utilizado nos ensaios laboratoriais	42
3.2	LCDS indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios laboratoriais . .	43
3.3	Esquema equivalente da montagem utilizada nos ensaios laboratoriais	44
3.4	Esquema simplificado da montagem em regime normal	44
3.5	Esquema do circuito elétrico utilizado para processamento do sinal referente à deformação medida	46
3.6	Bloco 1 do circuito elétrico utilizado	47
3.7	Extensômetro passivo para compensação de temperatura. Colocado em azoto líquido sem qualquer deformação	48
3.8	Modelo do extensômetro utilizado nos ensaios laboratoriais	49
3.9	Extensômetro colocado para medição dos esforços axiais	50
3.10	Extensômetro colocado para medição dos esforços radiais	50
3.11	Adesivo CC-33A utilizado na aplicação dos extensômetros	51
3.12	Esquema do AMP02	53
3.13	Bloco 2 do circuito elétrico utilizado	53
3.14	Sinal antes e após a retificação	54
3.15	Esquema do OP2177	54
3.16	Bobina de Rogowski aplicada a fita supercondutora para medição da corrente na espira	55

3.17 Diagrama representativo do processamento de sinal no caso de haver ou não esforços aplicados à fita supercondutora	56
4.1 Modelo de simulação do LCDS indutivo monofásico	60
4.2 Esquema ilustrativo da montagem utilizada nos ensaios laboratoriais	61
4.3 Diferentes configurações utilizadas nos ensaios laboratoriais	63
4.4 Tensão mecânica axial e radial medida em fita supercondutora YBCO e corrente de linha	64
4.5 Montagem para medição de esforços utilizando 2 espiras YBCO	66
4.6 Tensão mecânica axial medida em duas fitas supercondutoras de YBCO e corrente na espira 2	67
4.7 Distribuição da densidade de fluxo magnético radial em duas espiras YBCO	68
4.8 Tensão mecânica radial medida em fita supercondutora de BSCCO e corrente de linha	69
4.9 Distribuição da densidade de fluxo magnético axial em duas espiras YBCO	69
4.10 Tensão mecânica axial e radial medida em fita supercondutora de BSCCO e corrente de linha	70

LISTA DE TABELAS

2.1	Algumas propriedades das fitas supercondutoras	12
2.2	Vantagens e Desvantagens do LCDS Indutivo	19
3.1	Canais utilizados pela placa NI-6008 e respectivas grandezas	55
4.1	Pâmetros utilizados nas simulações do LCDS	60

SIMBOLOGIA

Símbolo	Descrição	Unidade
σ	Tensão mecânica	Pa
ν	Coefficiente de Poisson	-
ε	Deformação mecânica	-
ΔD	Variação da largura de um objecto	m
ΔL	Variação do comprimento de um objecto	m
ΔR	Variação da resistência elétrica	Ω
μ_0	Permeabilidade magnética no vazio	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$
ε_l	Deformação mecânica longitudinal	-
ε_t	Deformação mecânica transversal	-
σ_x	Tensão mecânica radial da fita supercondutora	Pa
ε_x	Deformação radial da fita supercondutora	-
ε_y	Deformação axial da fita supercondutora	-
σ_y	Tensão mecânica axial da fita supercondutora	Pa
A	Área da secção de um objecto	m^2
B	Densidade de fluxo magnético	T
B_a	Campo de indução de dispersão axial	T
B_c	Densidade de fluxo magnético crítico	T
B_r	Campo de indução de dispersão radial	T
D	Largura inicial de um objecto	m
D_m	Diâmetro médio de uma espira	m
E	Vetor campo elétrico	$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
E_y	Coefficiente de elasticidade	Pa
F	Vetor Força	N
F_a	Força axial	N
F_r	Força radial	N
G_1	Ganho do amplificador do bloco 1	-
G_2	Ganho do amplificador do bloco 2	-
H	Campo magnético	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
H_c	Campo magnético crítico	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
H_{c10}	Campo magnético crítico inferior	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$

Símbolo	Descrição	Unidade
H_{c20}	Campo magnético crítico superior	$A \cdot m^{-1}$
I_0	Corrente DC	A
I_{linha}	Corrente de linha	A
I_p	Corrente que percorre o enrolamento primário	A
I_s	Corrente que percorre o enrolamento secundário	A
J	Densidade de corrente elétrica	$A \cdot m^{-1}$
J_c	Densidade de corrente elétrica crítica	$A \cdot m^{-1}$
K	Fator de sensibilidade de um extensômetro	-
L	Comprimento inicial de um objecto	m
M	Vetor Magnetização	$V \cdot m^{-1}$
N_p	Número de espiras no enrolamento primário	-
N_s	Número de espiras no enrolamento secundário	-
R	Resistência elétrica	Ω
R_C	Resistência de carga	Ω
R_{EXT1}	Resistência representativa de um extensômetro	Ω
R_{EXT2}	Extensômetro utilizado na compensação de temperatura	Ω
R_G	Resistência utilizada para definir o ganho do amplificador	Ω
R_L	Resistência de linha	Ω
R_{POT}	Resistência representativa do potenciômetro	Ω
R_p	Resistência de protecção do supercondutor	Ω
T_c	Temperatura crítica	K
U_{fonte}	Tensão imposta pelo Auto-Transformador	V
V_a	Nó positivo da Ponte de Wheatstone	V
V_b	Nó negativo da Ponte de Wheatstone	V
V_i	Sinal de excitação da Ponte de Wheatstone	V
V_o	Sinal de saída da Ponte de Wheatstone	V
V_{outDC}	Sinal de saída representativo da deformação mecânica	V
X_m	Susceptibilidade magnética	-
c	Módulo de elasticidade do papel isolante	Pa
e	Espessura do condutor	m
h	Altura do enrolamento	m
l	Comprimento de uma espira	m
m	Número de cunhas	-
n	Número de espiras numa bobina	-
r	Raio do enrolamento	m
s	Comprimento dos espaçadores	m

NOTAÇÕES

1G	Fita supercondutora de primeira geração
2G	Fita supercondutora de segunda geração
AC	<i>Alternating Current</i>
Bi-2223	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$
Bi-2212	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$
BSCCO	<i>Bismuth strontium calcium copper oxide</i>
CC	Curto-circuito
DC	<i>Direct Current</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FMM	Força Magnetomotriz
LCDS	Limitador de Corrente de Defeito Supercondutor
NI	<i>National Instruments</i>
SAT	Supercondutor de Alta Temperatura
SC	Supercondutor
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
YBCO	<i>Yttrium barium copper oxide</i>

INTRODUÇÃO

O presente capítulo inicia-se descrevendo a base do problema em estudo, salientando a importância do desenvolvimento deste trabalho. Serão apresentados os objetivos, juntamente com a organização desta dissertação. Por fim, é feita referência às contribuições originais resultantes deste trabalho.

1.1 Motivação

A necessidade de uma maior e melhor distribuição de energia, leva ao constante o progresso e desenvolvimento da rede elétrica. Estas redes começam a ser cada vez mais complexas, sendo constituídas por uma grande diversidade de dispositivos de potência, desde motores e geradores, até transformadores e limitadores de corrente. Todos estes equipamentos estão constantemente sujeitos à possível ocorrência de falhas na rede, em grande parte correntes de CC. Associados a estas perturbações, acumulam-se os custos da reparação dos equipamentos, bem como cortes na distribuição de energia, penalizando os consumidores.

A descoberta do material supercondutor de alta temperatura (SAT), juntamente com o aumento da sua produção, proporcionou o desenvolvimento de uma alternativa viável à proteção da rede, sendo o caso em estudo, LCDS. Em regime normal, têm a vantagem de serem imperceptíveis na rede, desempenhando uma função imprescindível na recuperação e proteção de dispositivos de potência em caso de avaria, nomeadamente correntes de CC.

Em caso de falha, ao haver um aumento repentino da corrente na linha, excede-se o valor crítico da corrente no material, o que leva à perda das características supercondutoras, tornando-se resistivo, havendo consequente penetração de fluxo no núcleo. É assim adicionada uma impedância elevada à rede, limitando a corrente de curto-circuito,

oferecendo uma resposta rápida e permitindo uma solução eficaz ao problema.

No entanto, também estes dispositivos com a função de limitar a corrente na linha em caso de falha, ficam sujeitos a esforços eletromecânicos que podem danificar e de alguma maneira inviabilizar o seu funcionamento na rede. O LCDS indutivo do tipo transformador tem o seu secundário constituído por uma ou mais fitas supercondutoras, essenciais para a limitação da corrente de curto-circuito. É importante estudar quais as limitações e esforços a que estes materiais estão sujeitos, com o objetivo de otimizar o seu funcionamento e explorar que metodologias podem ser aplicadas.

Havendo cada vez mais interesse em tecnologias que utilizam materiais supercondutoras, tendo em conta as vantagens que oferecem, é necessário caracterizar o funcionamento destes equipamentos de modo a que se possa garantir um melhor desempenho e segurança possíveis. A presente dissertação apresenta o desenvolvimento de um método baseado na extensometria, que permite quantificar as tensões mecânicas que as fitas supercondutoras sofrem na ocorrência de falha, pretendendo-se assim contribuir para o estudo e otimização dos dispositivos de potência, principalmente em dispositivos que utilizam SAT.

1.2 Objetivos

Os objetivos gerais desta dissertação assentam sobre o estudo dos esforços eletromecânicos em fitas supercondutoras usadas como secundário de um LCDS ensaiado em regime sinusoidal à frequência de 50 Hz, na ocorrência de corrente de curto-circuito. São eles:

- ⇒ Estudo teórico dos esforços eletromecânicos desenvolvidos em limitadores de corrente.
- ⇒ Simulações utilizando o Método de Elementos Finitos do comportamento do LCDS.
- ⇒ Desenvolvimento de um método de medição dos esforços mecânicos utilizando extensómetros.
- ⇒ Realização de ensaios de modo a obter dados relativos aos esforços axiais e radiais a que a fita supercondutora se encontra submetida, aquando corrente de curto-circuito.
- ⇒ Análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais comparando-os com as simulações realizadas.

1.3 Contribuições originais

O trabalho desenvolvido nesta dissertação deu origem à submissão de um resumo intitulado *"Measurements of electromechanical forces in superconducting fault current limiters tapes under short circuit conditions"* para apresentação na conferência ASC 2016 *"Applied*

Superconductivity Conference", o qual se encontra ainda em fase de apreciação à data de entrega desta dissertação.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. Para além deste capítulo introdutório, os restantes podem ser resumidos do modo a seguir apresentado.

- ⇒ **Capítulo 2 : Revisão Bibliográfica** Faz-se o levantamento bibliográfico dos temas explorados para a realização da dissertação. Primeiramente, introduzem-se conceitos fundamentais relativos à supercondutividade, aos diferentes tipos de supercondutores e aos tipos de aplicações dos limitadores de corrente. Exploram-se ainda os esforços eletromecânicos a que estes equipamentos se encontram submetidos, finalizando com um estudo detalhado acerca da solução utilizada nesta dissertação, neste caso a extensometria.
- ⇒ **Capítulo 3 : Método aplicado** É apresentado o método utilizado como resposta ao problema proposto nesta dissertação. Apresentam-se os diferentes componentes utilizados e o seu dimensionamento, quer a nível de montagem do ensaio experimental, quer a nível do circuito para aquisição de dados.
- ⇒ **Capítulo 4 : Medição, análise e discussão dos resultados obtidos** São descritos os equipamentos utilizados durante os ensaios laboratoriais, bem como uma breve descrição da sua função. Analisa-se o procedimento experimental e procede-se à apresentação dos dados resultantes dos ensaios efetuados. Em especial são ilustrados os esforços axiais e radiais presentes na fita supercondutora em situação de falha
- ⇒ **Capítulo 5 : Conclusões e Trabalho Futuro** São retiradas conclusões face aos resultados obtidos e é feita uma reflexão final acerca do desenvolvimento da dissertação. Ainda são sugeridos possíveis trabalhos futuros que poderão acrescentar conhecimentos ao trabalho iniciado nesta dissertação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão introduzidos e tratados alguns conceitos e temas essenciais para uma melhor compreensão do trabalho proposto nesta dissertação. Apresenta-se inicialmente uma breve descrição da evolução e principais características dos materiais supercondutores, seguindo-se uma explicação e descrição dos LCDS.

Por fim, um subcapítulo dedicado à Extensometria, incluindo toda a teoria adjacente, e finalizando com os fundamentos teóricos sobre esforços electromecânicos desenvolvidos em dispositivos de potência.

2.1 Supercondutividade

2.1.1 Enquadramento histórico

A supercondutividade é uma propriedade física de certos materiais, que quando submetidos a determinadas temperaturas, neste caso, na ordem das dezenas de graus Kelvin, conseguem conduzir densidades de corrente elétrica muito superiores às dos condutores tradicionais, sendo as perdas resistivas desprezáveis. No início do século XX, o físico H. Kamerlingh Onnes tinha como objetivo estudar o comportamento da resistência elétrica de certos materiais a temperaturas muito baixas, sabendo-se apenas que a resistência diminuía, à medida que a temperatura ia diminuindo. Após ter alcançado valores extremamente baixos durante os seus ensaios com a liquefação do hélio, incentivou o estudo de novas soluções no âmbito da supercondutividade.

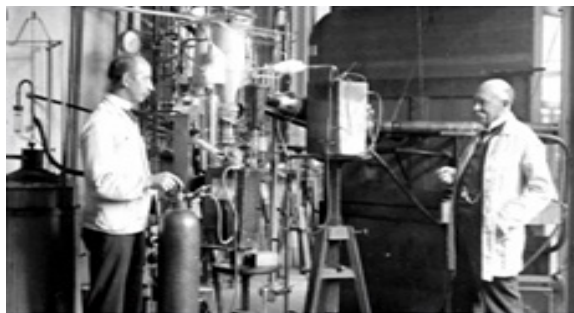


Figura 2.1: Heike Kamerlingh Onnes (à direita) and Gerrit Flim, o seu técnico, junto do liquidificador de Hélio, no Laboratório de Leiden, em 1911 (retirado de [1])

O estado supercondutor, seria então descoberto por este mesmo cientista, em 1911, no seu laboratório em Leiden, na Holanda, onde verificou em ensaios com mercúrio, que ao atingir uma determinada temperatura, este material apresentava uma queda abrupta na sua resistência elétrica, não diminuindo de forma suave, como seria espetável. Assim, juntamente com os estudos anteriormente desenvolvidos na liquefação do hélio, acabaria por ser galardoado com o Prémio Nobel da Física, em 1913. Todas estas descobertas impulsionaram inúmeros cientistas, na época e nas décadas seguintes, a dedicarem-se ao estudo dos materiais a baixas temperaturas, tendo-se desenvolvido um grande avanço tecnológico nesta área, culminando em 1986 com George Bednorz e Alexander Müller, a descobrirem o primeiro material SAT, o qual será referido no capítulo 2.1.3.

2.1.2 Propriedades dos materiais supercondutores

Nesta secção, serão apresentadas algumas das propriedades dos materiais supercondutores, nomeadamente o Efeito Meissner e a resistividade nula. Por fim, os diferentes tipos de materiais supercondutores serão sucintamente diferenciados, destacando-se em particular os SAT.

Uma das principais características dos materiais supercondutores é a sua temperatura crítica, T_c . Este valor divide o seu comportamento, separando a zona onde estes possuem carácter condutor da zona onde se apresenta resistivo. Isto é, abaixo de T_c , a resistência destes materiais cai abruptamente, Fig. 2.2, tornando-os supercondutores, caso contrário, se o valor da temperatura for superior a T_c , o material encontra-se no estado normal, ou seja, resistivo.

A par deste valor, existem ainda dois que completam o diagrama de fases de um supercondutor, Fig. 2.3, sendo estes, a densidade de corrente crítica J_c e o campo de indução magnética crítico B_c .

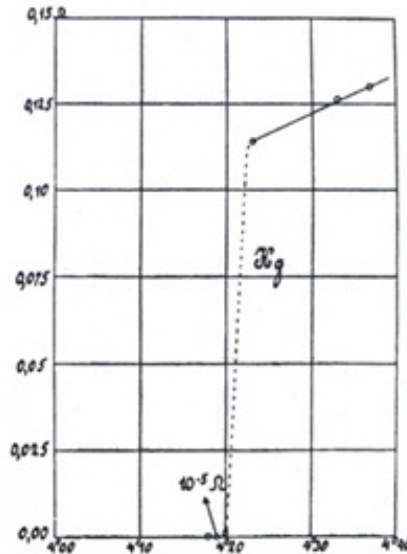


Figura 2.2: Onnes verificou que a resistência cai abruptamente após atingir a temperatura de 4.20 K (retirado de [2])

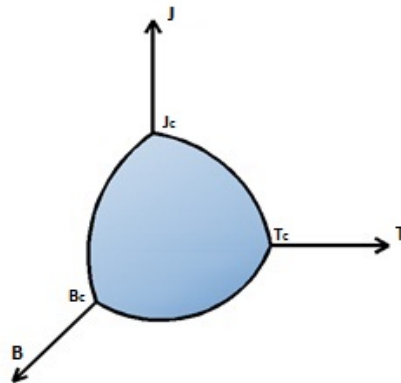


Figura 2.3: Diagrama de fases de um supercondutor

Analogamente à temperatura crítica, tanto J_c como B_c , limitam o comportamento de um determinado material, estabelecendo espacialmente a zona onde este apresentará características supercondutoras. Verifica-se então que, se qualquer uma destas condições se alterar, o material irá transitar para o seu estado normal.

2.1.2.1 Resistividade Nula

Idealmente, em regime de corrente contínua (DC), um material supercondutor não apresenta qualquer dissipação de energia, isto é, apresenta resistividade nula o que, por conseguinte, faz com que a sua condutividade seja considerada perfeita. No caso de uma corrente DC, o material não apresenta campo eléctrico E , fazendo com que a densidade de corrente normal seja nula $J_n = \sigma_n \cdot E = 0$, não existindo condução por parte dos condutores de carga. Por outro lado, quando a corrente apresenta uma componente alternada (AC), apesar de muito reduzidas, continuam a existir algumas perdas, tendo em conta que

o material nesta situação apresenta alguma resistividade [3].

Este fenómeno é explicado pela existência dos chamados pares de Cooper, apresentados na teoria BCS desenvolvida em 1957 por John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer, onde se afirmou que os eletrões, num material que se apresente em estado supercondutor, se encontram agrupados em pares. Ao contrário do deslocamento de um eletrão na rede cristalina de um material, que vai perturbando os átomos presentes nesta, criando então uma resistividade elétrica, estes pares, a temperaturas suficientemente baixas, conseguem deslocar-se sem interferir com a restante rede cristalina, levando à resistividade nula. Esta teoria fez com que estes físicos, fossem galardoados com o Prémio Nobel da Física em 1972. A corrente numa espira supercondutora, poderia persistir durante anos, sem qualquer tipo de degradação, dependendo da geometria do material e da temperatura a que este estaria submetido [4].

2.1.2.2 Efeito Meissner e Supercondutores do Tipo I e II

Walter Meissner e Robert Ochsenfeld, em 1933, descobriram que um material no estado supercondutor apresentava diamagnetismo perfeito, isto é, quando submetido a um campo de indução magnética, este repelia as linhas de fluxo no seu interior, exibindo internamente indução magnética nula, $B = 0$. A densidade de fluxo magnético é definida pela Eq. 2.1.

$$B = \mu \cdot (H + M) \quad (2.1)$$

Sabendo que no diamagnetismo perfeito a susceptibilidade apresenta valor $X_m = -1$, verifica-se a relação entre o campo magnético H e o vetor magnetização M ,

$$M = -H \quad (2.2)$$

Podemos concluir que não existe densidade de fluxo no interior do supercondutor, traduzindo-se isso por, $B = 0$. No entanto, num condutor perfeito, não havendo campo elétrico, verifica-se a condição $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$, fazendo com que a variação das linhas de fluxo seja constante ao longo do tempo. No entanto, pode existir fluxo no interior do condutor como se verifica na Fig. 2.4. Observa-se que as linhas de fluxo apresentam comportamento diferente, quando o material está submetido a um determinado campo magnético. Esta diferença permitiu justificar e demonstrar que este tipo de material vai para além dos condutores perfeitos.

Tendo em conta o fenómeno apresentado, foi possível distinguir dois tipos de materiais supercondutores, consoante o seu comportamento e a sua resposta aquando submetidos a um campo magnético exterior. Nos Supercondutores de Tipo I existe apenas uma penetração superficial de fluxo, criando uma blindagem na superfície do material, apresentando diamagnetismo perfeito, caracterizado pelo efeito de Meissner. No entanto, quando sujeito a campos superiores ao campo de indução magnética crítico B_c , o material passa ao estado normal, perdendo as propriedades supercondutoras.

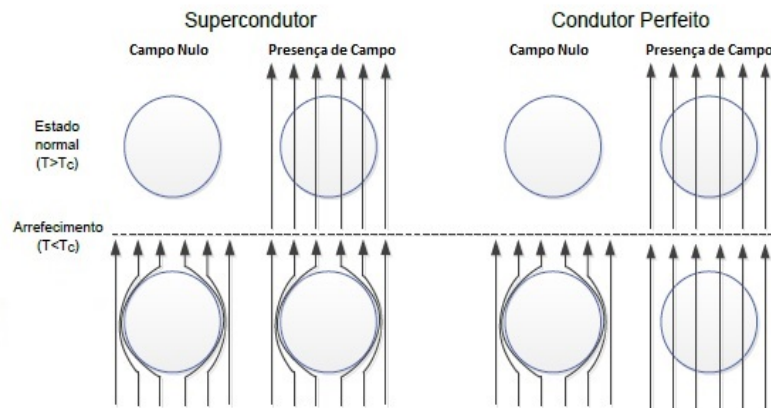


Figura 2.4: Comparação entre supercondutor e condutor perfeito quando $T < T_c$ em campo nulo ou na presença de campo, adaptado de [5]

Analogamente aos primeiros, os Supercondutores do tipo II também saem da zona de supercondutividade, quando presentes a campos superiores a H_c . No entanto, como se pode observar na Fig. 2.5, existe uma fase de transição iniciada com H_{c10} , definida por um Estado Misto, onde o material apresenta regiões no estado normal, cercadas por regiões supercondutoras. Nestas regiões mistas existe penetração de campo magnético no material, o que faz com que exista este estágio intermédio, até que se atinja o valor máximo suportado de campo magnético crítico, H_{c20} . Alcançando esse valor, analogamente aos supercondutores do tipo I, o material perde por completo estas características, voltando ao estado normal [5].

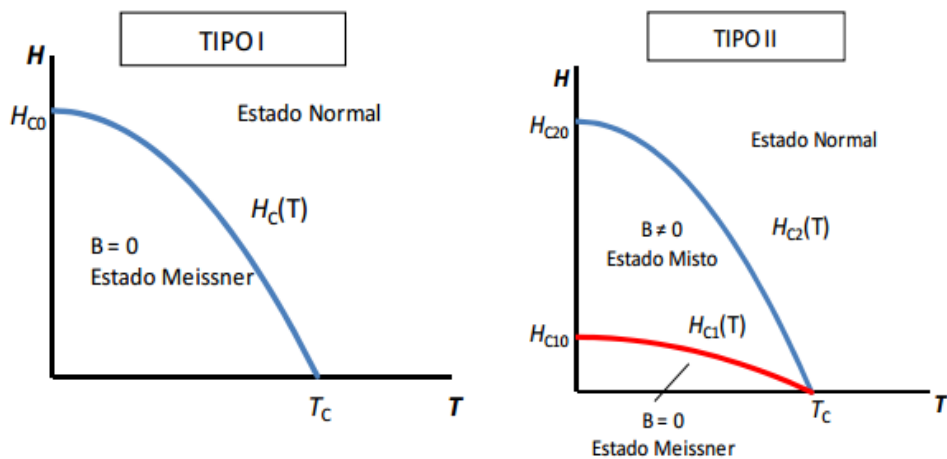


Figura 2.5: Comportamento dos supercondutores do tipo I e II (retirado de [6])

2.1.3 Supercondutores de alta temperatura

Desde a descoberta da supercondutividade que o principal objetivo era conseguir alcançar temperaturas de funcionamento mais elevadas, tentando evitar o elevado custo dos líquidos criogénicos. Tendo em conta que a liquefação do hélio era uma via demasiado cara, poucos tinham oportunidade de testar os materiais supercondutores. Esta situação manteve-se até 1986, quando Georg Bednorz e K. Alex Müller, investigadores da IBM, abriram novos horizontes no que diz respeito ao estudo e conhecimento das capacidades dos materiais supercondutores. Até aí, apenas teria sido conseguida a temperatura de 23.2 K em filmes finos de Nb_3Ge , até que ao estudarem as propriedades elétricas das perovskites, estes cientistas descobriram um novo material supercondutor que tinha como temperatura crítica 30 K, óxido de cobre lantânio e bário, LBCO [7].

Em 1987, M.K. Wu e Paul Chu, juntamente com os seus alunos, J.R. Ashburn e C.J. Torng [8], na Universidade de Alabama, em Huntsville, descobriram que o material óxido de cobre, ítrio e bário YBCO, tinha temperatura crítica (T_c) de 93 K (primeiras amostras foram $\text{Y}_{1.2}\text{Ba}_{0.8}\text{CuO}_4$). Este trabalho possibilitou um enorme avanço no que diz respeito a supercondutores de alta temperatura, marcando uma nova era na ciência deste tipo de materiais. Desde então, foram estudados e descobertos diferentes tipos de materiais supercondutores, tendo-se como objetivo descobrir temperaturas de funcionamento mais elevadas. A Fig. 2.6 ilustra a evolução cronológica dos diferentes materiais supercondutores e respetivas temperaturas críticas.

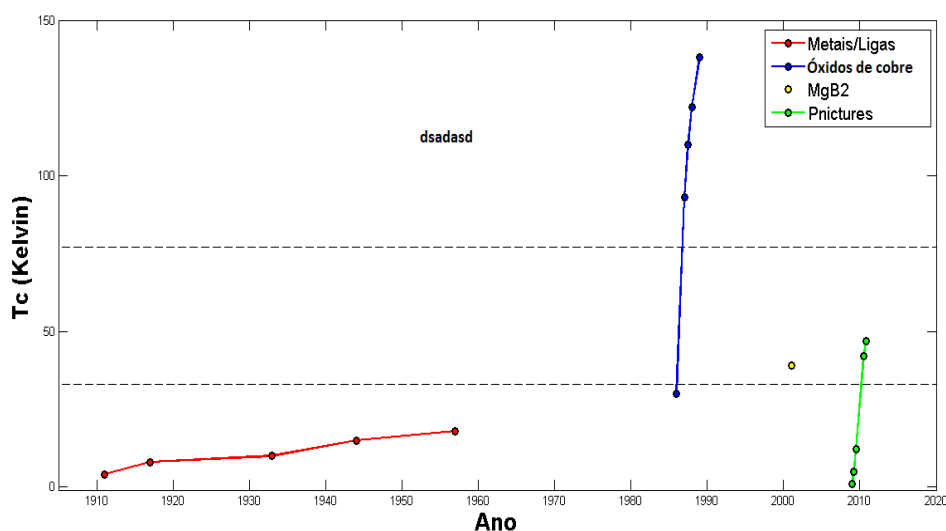


Figura 2.6: Evolução da temperatura crítica dos materiais supercondutores (adaptado de [9])

Os materiais de alta temperatura possibilitam novas oportunidades na investigação e uma maior diversidade de aplicações, tendo em conta o facto de os sistemas de criogenia

serem mais baratos, pois trabalham a temperaturas mais elevadas. Em aplicações de energia, destacam-se dois materiais supercondutores, cerâmicos, compostos à base de óxidos de cobre, BSCCO e YBCO. Estes materiais serão os utilizados neste trabalho na forma de fitas supercondutoras, como ilustrado nas Fig. 2.7 e 2.8. Para além desta configuração também são comercializados materiais supercondutores em formato de blocos maciços e de cabos mono e trifásicos, sendo que a escolha irá depender da utilização e objetivos do estudo.



Figura 2.7: Fita 1ª Geração BSCCO (InnoST)



Figura 2.8: Fita 2ª Geração YBCO (SCS4050 - SuperPower)

A evolução constante da investigação no âmbito da supercondutividade conduziu à divisão das fitas supercondutoras em duas gerações, marcadas em grande parte pelas suas propriedades químicas, mecânicas, elétricas e magnéticas.

As fitas de primeira geração 1G, têm filamentos de BSCCO embebidos numa matriz de prata que lhe confere maior ductibilidade. As de segunda geração 2G, apresentam melhores propriedades mecânicas, maior valor de campo magnético crítico e maior densidade de corrente crítica. Na Fig. 2.9 estão representadas as secções de fitas de primeira e segunda geração, respetivamente [23].



a Secção recta da fita, com 55 filamentos (a escuro) embebidos numa matriz de prata (a claro).



b Secção recta da fita. Esta é laminada a cobre, bronze ou aço inoxidável em ambas as faces, por questões de robustez mecânica, eléctrica e térmica.

Figura 2.9: Secção recta de fitas supercondutoras

A Tabela 2.1, apresenta as principais características dos dois tipos de fita utilizados nos ensaios.

O módulo de Young, ou coeficiente de elasticidade representa, na característica do material, o declive da recta na zona de deformação elástica. As Fig. 2.10 e 2.11 apresentam as respetivas características mecânicas destes dois materiais supercondutores.

Tabela 2.1: Algumas propriedades das fitas supercondutoras

	BSCCO	YBCO
Fórmula Química	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$
Corrente Crítica	90	100
Densidade de Corrente Crítica (A/mm^2)	93	250
Temperatura Crítica (K)	105	92
Espessura (mm)	0.23	0.1
Largura (mm)	4.2	4
Módulo de Young (GPa)	77 [10]	116.7 [11]

Analisando as figuras verifica-se que a resistência mecânica das fitas de segunda geração face às 1G. Na Fig. 2.10 a característica G representa uma fita supercondutora de segunda geração, sendo que as restantes são de primeira geração, em particular a recta A, fabricada pela empresa InnoST, semelhante à utilizada nos ensaios experimentais. As fitas YBCO começam a assumir deformações plásticas a partir dos ≈ 700 MPa, enquanto que as fitas BSCCO apenas aguentam esforços mecânicos na zona elástica até ≈ 300 MPa. No entanto, as fitas YBCO a partir dos ≈ 970 MPa, podem apresentar danos na própria rede cristalina. Como referenciado em [11], a partir deste último valor, também denominado limite de ruptura, a fita não consegue regressar ao seu estado inicial, sofrendo assim uma deformação permanente. Estas grandezas são de grande importância neste trabalho, pelo que voltarão a ser referidas no capítulo 4.

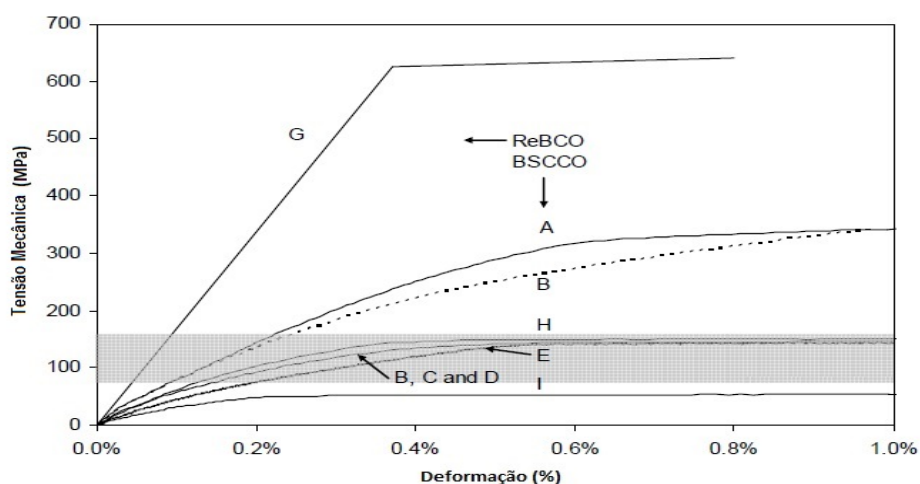


Figura 2.10: Característica mecânica da fita supercondutora BSCCO, representada pela recta A (adaptado de [10])

77K Tensão Limite de Elasticidade 700MPa
Limite de Deformação Elástica $\approx 0.6\%$

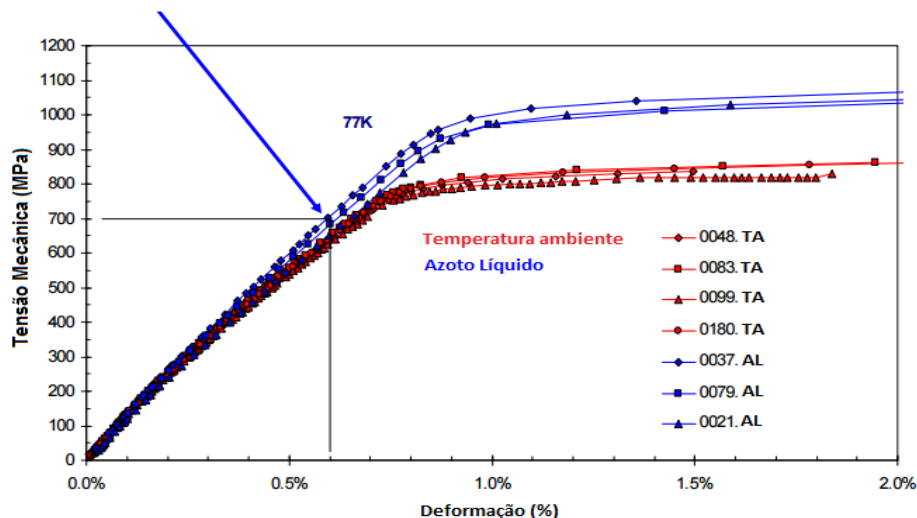


Figura 2.11: Característica mecânica da fita supercondutora YBCO SCS4050 (adaptado de [11])

2.2 LCDS – Limitadores de corrente de defeito supercondutores

O dispositivo de potência utilizado durante os ensaios laboratoriais foi um Limitador de Corrente de Defeito Supercondutor, LCDS. Nesta secção descreve-se o seu funcionamento, bem como os diferentes tipos de configurações que existem utilizando estes dispositivos. Serão ilustradas ainda algumas das principais aplicações e quais as vantagens da sua utilização.

2.2.1 Introdução

O constante crescimento das redes de energia e a sua maior complexidade poderá resultar num maior número de falhas, em grande parte correntes de curto-circuito. Estas correntes são responsáveis pelo desgaste e avarias em dispositivos de potência, podendo provocar danos irreversíveis. É então necessário estudar e desenvolver novas soluções que respondam melhor e de maneira mais fiável às necessidades do utilizador.

A descoberta dos materiais supercondutores permitiu o desenvolvimento de equipamentos capazes de proteger os dispositivos presentes na rede, oferecendo melhores recuperações em caso de falha. Esses equipamentos são chamados Limitadores de Corrente de Defeito Supercondutores.

Por outro lado, em caso de avaria num equipamento, ao haver um aumento repentino da corrente na linha, excede-se o valor crítico da corrente no material, o que leva à perda das características supercondutoras, tornando-se resistivo e permitindo a penetração de fluxo no núcleo. Há, desta forma, uma impedância adicionada à rede, a qual limitará a

corrente de curto-circuito. A Fig. 2.12 representa o funcionamento de um LCDS antes, durante e depois da ocorrência de uma falha.

Estes dispositivos apresentam características específicas no que diz respeito ao seu comportamento e ação na rede de energia. Destacam-se entre elas as seguintes:

- Possuem **impedância variável**, consoante se encontrem em regime de falha ou funcionamento normal.
- São “**invisíveis**” na rede em normal situação de funcionamento.
- Apresentam rápidos **tempos de recuperação**, havendo apenas necessidade de aguardar até o material recuperar o estado supercondutor.
- Oferecem uma grande capacidade de limitação da corrente de curto-circuito, protegendo e assegurando a integridade dos restantes dispositivos presentes na rede.

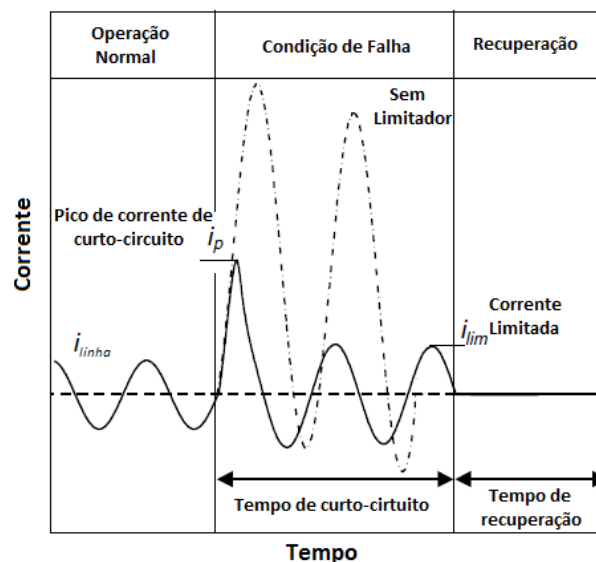


Figura 2.12: Comportamento da corrente na linha com LCDS (adaptado de [12])

Todas estas características tornam este equipamento uma solução bastante atrativa. Neste trabalho irá ser utilizado um Limitador Monofásico do tipo Indutivo, no entanto apresenta-se na secção seguinte uma breve revisão dos principais modelos de LCDS.

2.2.2 Tipos de LCDS

Dependendo do objetivo, do local da rede onde serão aplicados e tendo em conta a potência associada, podem usar-se LCDS monofásicos ou trifásicos. Dentro destas duas configurações existem essencialmente três topologias diferentes:

- Resistivo

- Indutivo
- Retificador

Nos subcapítulos que se seguem irá ser brevemente explicado o funcionamento de cada uma destas topologias, bem como alguns dos estudos e projetos onde foram utilizados, juntamente com algumas das suas aplicações. Será dada maior atenção ao LCDS indutivo do tipo transformador, uma vez que é o utilizado nos ensaios detalhados nesta dissertação.

2.2.2.1 LCDS Resistivo

No primeiro caso, o limitador é constituído por um elemento supercondutor inserido em série com o sistema a ser protegido, como se ilustra na Fig. 2.13. A passagem do material do estado supercondutor para o estado normal, também conhecido por “*quench*”, está na base do seu funcionamento.

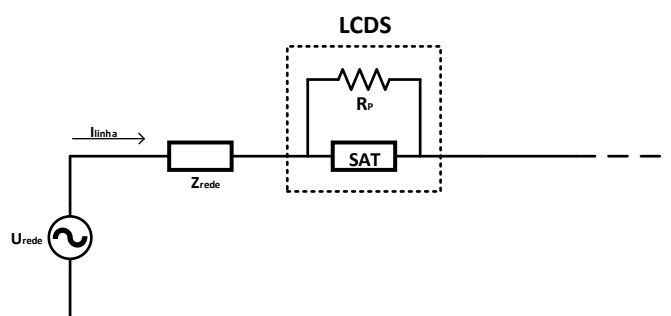


Figura 2.13: Esquema elétrico do LCDS resistivo puro

O processo de limitação de corrente ocorre quando o material supercondutor perde as suas características, devido à ocorrência de falha, que por sua vez vão fazer com que este equipamento adquira um carácter altamente resistivo, protegendo os restantes elementos na rede. A resistência R_p , representada no esquema, é utilizada para garantir a integridade do material SAT, protegendo-o de sobretensões e funcionando como um caminho alternativo à corrente. A empresa alemã Nexans Superconductors é uma das principais pioneiras no desenvolvimento, estudo e implementação de novas tecnologias utilizando LCDS. Em 2004, foi testado pela primeira vez na rede de distribuição alemã de 10 kV um limitador resistivo, a par do projeto CURL10, constituído por bobinas bifilares de Bi-2212 maciço e temperatura de operação de 66 K, de configuração trifásica e potência 10 MVA [13].

Ainda a mesma empresa, juntamente com outros parceiros, desenvolveu um projeto europeu, denominado ECCOFLOW, utilizando também um LCDS trifásico resistivo, composto por camadas de fitas 2G orientadas paralelamente. Toda a informação, resultados e dimensionamento pode ser encontrada em [14].

2.2.2.2 LCDS Indutivo

A segunda topologia, Limitador de Corrente de Defeito Supercondutor do tipo Indutivo, foi o utilizado nos ensaios laboratoriais e foi descrito pela primeira vez por Helmut Dersch, podendo ser consultado em [15]. Os fenômenos magnéticos são responsáveis pelo seu funcionamento e o facto de ter um aspeto construtivo semelhante ao de um transformador. A Fig. 2.14 ilustra o funcionamento de um LCDS indutivo do tipo transformador. O primário é constituído por enrolamentos de cobre, enquanto o secundário, é constituído por fita supercondutora curtocircuitada.

Em regime normal o secundário é responsável por blindar o fluxo simples do núcleo, ou seja, a força magnetomotriz FMM criada pelo primário é anulada pelo secundário, pelo que aos terminais do LCDS não existe tensão. Em caso de ocorrência de falha, a corrente de linha passa a ser superior à corrente crítica do supercondutor, permitindo a penetração do fluxo no ferro. Nesta situação, o secundário não consegue blindar magneticamente o núcleo, elevando consideravelmente o fluxo ligado com o primário, o que provoca um aumento do coeficiente de indução e por consequência o aumento da impedância do dispositivo. Por sua vez, esta impedância irá limitar a corrente, garantindo a segurança dos restantes equipamentos presentes na rede.

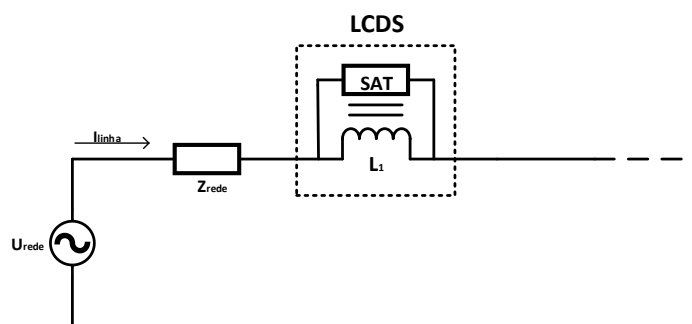


Figura 2.14: Esquema elétrico do LCDS indutivo tipo transformador

Apesar do tipo resistivo ter melhor capacidade para limitar a corrente do que o tipo transformador, este segundo traz algumas vantagens no que diz respeito à integridade e durabilidade da fita supercondutora. O facto de haver um aumento da resistência no limitador do tipo resistivo, faz com que o material aqueça mais podendo não suportar falhas sucessivas tão bem quanto o LCDS do tipo indutivo [16]. No entanto, a dimensão e peso do limitador indutivo resultante do núcleo de ferro, podem ser consideradas desvantagens.

Vários projetos e estudos sobre este tipo de limitador que foram levados a cabo, têm demonstrado que pode ser uma solução muito atrativa e polivalente, podendo ter utilização em diferentes aplicações na energia. Por exemplo, em Novembro de 1996, um LCDS indutivo trifásico de 10,5 kV e corrente nominal 70 A, foi instalado e testado durante um ano numa central hidroelétrica na Suíça, por parte da empresa ABB [17], como ilustra a Fig. 2.15. No ano seguinte, no Japão, um limitador monofásico, construído pela empresa

CRIEPI, com tensão e corrente nominal de 6,6 kV e 400 A , respetivamente, foi também testado [18]. Diversos estudos contribuíram para a demonstração da viabilidade dos limitadores de corrente do tipo indutivo, usando também configurações de cilindros ocos ou anéis de fita SAT empilhados [19].



Figura 2.15: LCDS trifásico fabricado pela empresa ABB na Suíça (retirado de [17])

Estes primeiros projetos incentivaram uma vasta gama de investigadores a continuar e desenvolver novos estudos no âmbito da limitação de corrente recorrendo a SAT. Em Dezembro de 2012, Y. Shirai juntamente com outros investigadores na Universidade de Kyoto, no Japão, ensaiaram um novo modelo baseado em enrolamentos concêntricos, em que as espiras supercondutoras foram enroladas em dois cilindros de diferentes diâmetros. Na presença de falha na rede, esta configuração permitiu que, em casos de correntes de CC baixas, apenas o secundário transitaria para o estado normal. No entanto, para amplitudes de falha elevadas, ambas as bobinas perderiam as propriedades supercondutoras.

Uma descrição detalhada das características deste limitador pode ser encontrada em [20].

Um dos projetos de grande importância e bastante inovadores no que diz respeito à utilização de LCDS indutivos, foi levado a cabo pela empresa Zenergy Power, em Outubro de 2008, o qual foi ensaiado, nos laboratórios da PowerTech, um limitador do tipo indutivo com núcleo saturado, de 1200 A e tensão nominal 15 kV. O sucesso destes ensaios fizeram com que no ano seguinte este dispositivo fosse instalado na rede elétrica, estando a operar desde então numa subestação no sul da Califórnia [21]. A Fig. 2.16 ilustra o aspeto deste equipamento.

Esta mesma empresa esteve inserida num projeto que visa instalar estes equipamentos numa plataforma eólica, recorrendo à utilização de LCDS indutivos, neste caso, de núcleos saturados, Fig. 2.17.



Figura 2.16: LCDS indutivo instalado na rede elétrica no Sul da Califórnia (retirado de [21])

Neste tipo de LCDS indutivo, são utilizadas duas bobinas ligadas em série com a rede e em oposição elétrica, com o objetivo de manter o fluxo ligado com as bobinas em sentidos opostos. Para isso, recorre-se à utilização de uma fonte DC que alimenta as bobinas supercondutoras, mantendo assim os núcleos saturados [5].

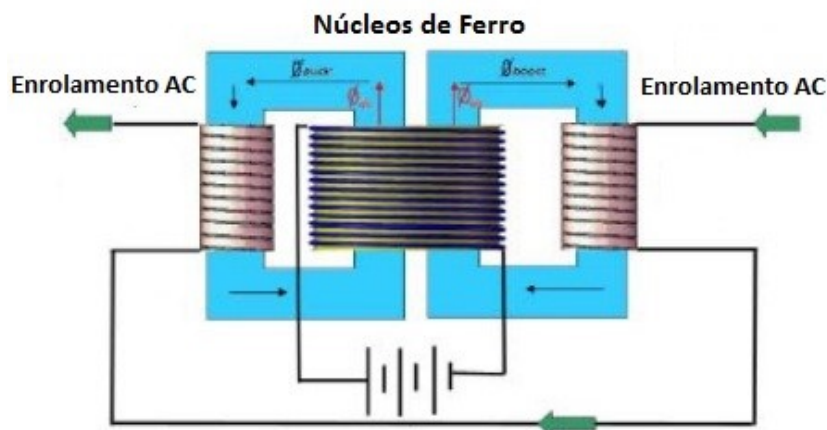


Figura 2.17: Esquema do LCDS indutivo de núcleos saturados utilizado na plataforma eólica (retirado de [22])

O objetivo principal foi estudar o desempenho destes dispositivos e a sua capacidade de proteger as turbinas em caso de falha, podendo ainda conseguir também com que o seu binário em regime transitório diminuísse. Estes dispositivos responderam com grande eficácia e mostraram uma solução viável para esta aplicação, tendo sido alcançados ótimos resultados. Mais informações acerca deste projeto, podem ser consultadas em [22].

Muitos outros projetos têm sido levados a cabo com o objetivo de descobrir novas aplicações e soluções para que este tipo de equipamentos possam trazer maior fiabilidade à rede elétrica.

2.2.2.3 LCDS Retificador

Este último modelo é constituído por uma ponte retificadora, um enrolamento supercondutor e uma fonte de tensão DC, como se ilustra no esquema elétrico da Fig. 2.18.

O funcionamento assenta na utilização de eletrónica de potência. A corrente I_0 , criada pela fonte DC, faz com que todos os elementos da ponte se encontrem ativos, pelo que a indutância pertencente ao elemento supercondutor não é tida em conta. O LCDS permanece assim transparente para a rede.

Em regime de falha, existe uma corrente de linha muito superior a I_0 , fazendo com que os elementos da ponte passem a estar ao corte, seja o par D_1 e D_2 , ou D_3 e D_4 , dependendo do ciclo em que se encontram. Este tipo de dispositivo apresenta uma vantagem, pois o SAT nunca perde as suas características supercondutoras, havendo uma maior conservação do material e uma rápida recuperação do limitador após uma falha.

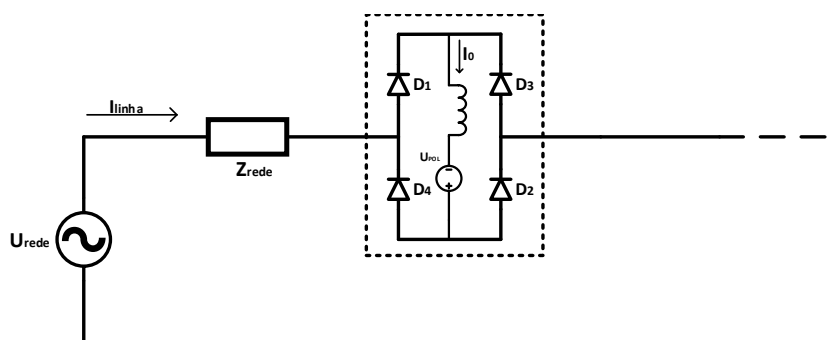


Figura 2.18: Esquema elétrico do LCDS retificador

2.2.3 Conclusão

Tendo em conta que o LCDS do tipo Indutivo foi a topologia utilizada nos ensaios realizados nesta dissertação e numa perspectiva de aplicações de potência, podem então destacar-se as seguintes vantagens e desvantagens desta topologia [23]:

Tabela 2.2: Vantagens e Desvantagens do LCDS Indutivo

VANTAGENS	DESvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Impedância variável consoante o número de enrolamentos que constitui o primário ✓ Maior segurança do material SC, tendo em conta a facilidade apresentada em suprimir pontos quentes ✓ Ligado magneticamente com a linha a proteger ✓ Não há necessidade de recuperar o estado supercondutor após a falha nem existem perdas AC (topologia sem amortecimento com núcleos saturados) 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Os núcleos ferromagnéticos resultam num peso e volume considerável ✗ Inoperáveis em redes DC ✗ Difícil integração em redes de alta tensão, devido à dificuldade em produzir SAT de blocos maços homogêneos, nas dimensões necessárias

Com o crescimento exponencial das redes de energia, é necessário garantir que a sua distribuição seja feita, de modo a evitar quaisquer tipo de avarias e perturbações. Para isso, existe um interesse cada vez maior em se optar por este tipo de equipamentos que apresentam grande capacidade de resposta e um importante papel na segurança e integridade dos restantes dispositivos.

A tipologia indutiva, é portanto bastante interessante para a proteção das redes, existindo ainda para este modelo, algumas dificuldades na comercialização devido à grande quantidade de material magnético necessário.

2.3 Esforços eletromecânicos em dispositivos de potência

Determinados tipos de falha impõem nos enrolamentos grandes esforços mecânicos que se traduzem em tensões mecânicas, forças de expansão e/ou compressão, responsáveis por avarias e possíveis danos irreversíveis nestes dispositivos. Estas forças resultam da existência de campos magnéticos e corrente que em caso de falha, podem danificar os dispositivos.

Verifica-se que grande parte dos danos provocados nos enrolamentos destas máquinas são devidos à existência destas forças eletromagnéticas que originam tensões mecânicas nos enrolamentos. Diferentes parâmetros influenciam diretamente a intensidade destas forças, tais como, as correntes que atravessam os enrolamentos, bem como alguma degradação existente no equipamento.

Como os LCDS são dispositivos que se integram na rede, tais como os transformadores, é importante o estudo e investigação do comportamento dos esforços eletromecânicos neste tipo de equipamentos.

Neste capítulo irão ser apresentados conceitos fundamentais acerca dos esforços eletromecânicos presentes em dispositivos de potência, quais os tipos existentes e respectivas características, bem como as consequências e falhas causadas por cada um deles. Descrever-se-ão algumas técnicas de medida utilizadas neste campo de estudo, apresentando algumas soluções, técnicas e métodos analíticos de cálculo dos esforços.

É de salientar que a bibliografia existente referente a esforços mecânicos em LCDS é reduzida comparativamente à existente para esforços em transformadores tradicionais, devido provavelmente ao facto desta tecnologia ser mais recente e se encontrar ainda em fase de investigação.

2.3.1 Esforços em enrolamentos de dispositivos de potência

Existem diversos dispositivos de potência afetados por falhas na rede, sendo que grande parte dos danos causados incide nos enrolamentos destes equipamentos, daí o estudo dos esforços aí presentes ser importante. Vibrações durante o seu funcionamento, adicionados às cada vez mais intensas e frequentes correntes de curto-circuito, são as principais causas da inevitável degradação destes equipamentos.

Quando um material condutor é submetido a um campo magnético ele sofre uma força. Um fio condutor de comprimento l , que transporte uma corrente i , no seio de um campo magnético B , fica sujeito a uma força F , como descrito na expressão 2.3. No entanto, a densidade de força num dado volume de um enrolamento é igual ao produto vetorial da densidade de corrente no enrolamento J , pela densidade de fluxo magnético de dispersão, resultando pela Lei das Forças de Lorentz, na expressão 2.4. Esta densidade de força será perpendicular ao plano formado pelo campo, com se pode verificar na Fig. 2.19, onde se apresenta o produto externo, proposta por John Ambrose Fleming [24].

$$\vec{F} = I \int_L d\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.4)$$

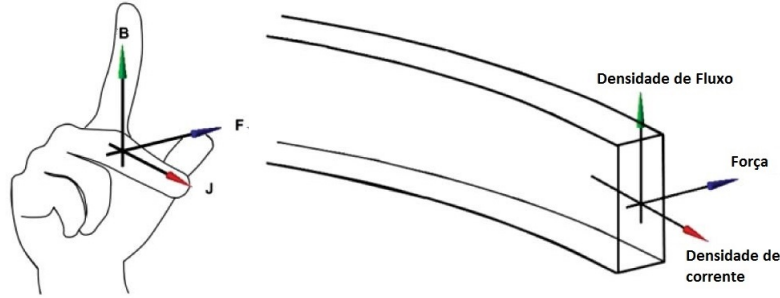


Figura 2.19: Representação esquemática da força de Laplace (adaptado de [24])

As forças presentes nas espiras de uma bobina são de atração, tendo em conta que a corrente que as percorre tem o mesmo sentido. No entanto, no caso dos transformadores que apresentam bobinas concêntricas, as forças presentes serão de repulsão, visto que as correntes nesta situação percorrem as espiras de cada bobina em sentidos opostos. Em regime normal não é de esperar que possam existir danos nos dispositivos de potência, mas na ocorrência de falhas, as correntes de curto-circuito podem ultrapassar até 10 vezes a corrente nominal, o que influencia diretamente a magnitude destas forças eletromagnéticas, resultando em ameaças à integridade dos equipamentos. A topologia e a distribuição dos enrolamentos, bem como as amplitudes e sentido da corrente envolvida, influenciam a distribuição do fluxo de dispersão. Diferentes configurações provocam diferentes tipos de falhas. Alguns exemplos podem ser encontrados em [24]. No caso de bobinas concêntricas a distribuição de fluxo encontra-se representada na Fig. 2.20, onde se pode perceber que a densidade de fluxo, com direção axial B_a , interage com a corrente nos enrolamentos, criando uma força radial F_r .

Este fenómeno resulta na repulsão entre o enrolamento interior e exterior. Por outro lado, o fluxo radial B_r , analogamente ao anterior irá produzir uma força axial F_a , a qual será responsável pela compressão ou expansão dos enrolamentos das bobinas. Apesar do exemplo citado se referir a um transformador de bobinas concêntricas, é necessário ter

em conta que no caso dos LCDS indutivo do tipo transformador e o facto de o secundário não ter a configuração descrita na Fig. 2.20, as direções e sentidos, bem como a relação entre as densidades de fluxo e as forças, mantêm-se equivalentes. Isto é, as densidades de fluxo de dispersão axiais são responsáveis pelas forças radiais e vice-versa.

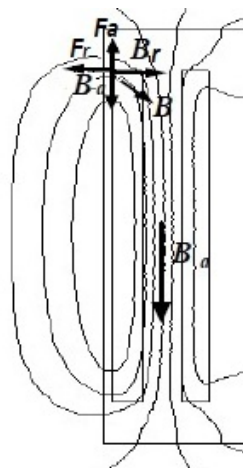


Figura 2.20: Distribuição das linhas de força dos campos de indução magnética em enrolamentos de bobinas concêntricas. Representação das densidades de fluxo radial e axial, B_r e B_a , respetivamente (adaptado de [25])

Pode concluir-se que as deformações presentes nos enrolamentos de um dispositivo de potência são causadas em grande parte pelas forças axiais e radiais. Sendo assim, nos subcapítulos seguintes desenvolver-se-á melhor estes esforços apresentando a origem de cada tipo de falha, bem como alguns métodos para os calcular.

2.3.1.1 Forças radiais e sua origem

Existe um grande número de estudos, onde se tenta calcular ou estimar o valor dos esforços radiais. Grande parte desses estudos baseia-se nos propostos inicialmente em [26] e pretendendo aperfeiçoar esses resultados. No entanto, atualmente os métodos computacionais têm vindo a ser cada vez mais aplicados. Entre outros métodos, destaca-se o *FEM*¹, têm por base representações bi e tri-dimensionais dos dispositivos em estudo, podendo simular a magnitude dos fluxos e as forças eletromagnéticas presentes nos equipamentos. A Fig. 2.21, representa um corte transversal de duas bobinas concêntricas onde se ilustra a presença dos esforços radiais e os diferentes comportamentos em cada um dos enrolamentos.

Analiticamente, estas forças podem ser calculadas tendo em conta o raciocínio descrito em [26]. Na configuração apresentada, aproxima-se a densidade de fluxo de dispersão axial B_a ao trapézio representado na Fig. 2.21. Esta aproximação resulta do facto de B_a ser mais intenso na superfície interna do enrolamento externo e na externa do enrolamento interno. Serão assumidas estas condições nos cálculos que se seguem.

¹FEM - Finite Element Method, em português, Método de Elementos Finitos

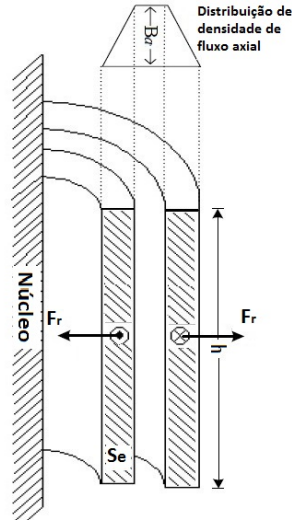


Figura 2.21: Representação em corte transversal de dois enrolamentos concêntricos e respectivas forças radiais (adaptado de [25])

A força eletromagnética descrita na Eq. 2.3, assume $l = \pi.D_m$ sendo D_m o diâmetro médio da espira, sendo reescrita e permitindo obter a força num enrolamento de n espiras,

$$F = B.nI.\pi.D_m \quad [N] \quad (2.5)$$

Considerando a densidade de fluxo B_a e sendo o campo constante ao longo do caminho no ponto médio dos enrolamentos, a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 , a altura do enrolamento h e por fim a força magnetomotriz nI , obtém-se

$$B_a = \mu_0.\frac{nI}{h} \quad [T] \quad (2.6)$$

O facto dos dois enrolamentos permanecerem sujeitos ao valor médio da densidade de fluxo ($\frac{1}{2}B_a$) e recorrendo às expressões anteriores obtém-se a força radial F_r presente em cada um dos enrolamentos, ou seja:

$$F_r = \frac{2\pi^2.(nI)^2.D_m}{h}.10^{-7} \quad [N] \quad (2.7)$$

Observa-se então pela figura 2.22 que vão existir forças de sentidos contrários nos enrolamentos.

Dependendo do enrolamento presente numa configuração de bobinas concêntricas, assim serão os danos e consequências para os dispositivos de potência. A capacidade de resistir a esforços destes enrolamentos, vai depender das estruturas de suporte, das configurações dos equipamentos e da gama de valores de corrente e tensões presentes na ocorrência de falha. Este tipo de forças provoca deformações de expansão no enrolamento externo, também chamadas de “hoop stress”, daí ser necessário haver uma atenção redobrada no dimensionamento destes condutores, de maneira a conseguirem suportar estes esforços. Recorrendo à Eq. 2.7, será possível calcular a tensão mecânica média.

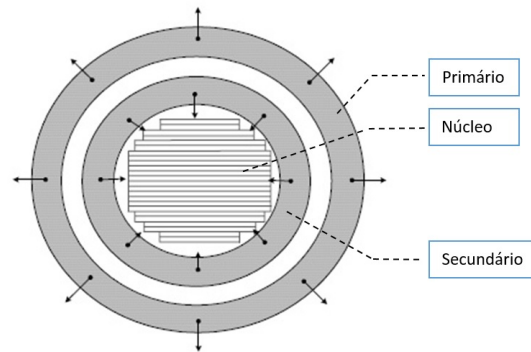


Figura 2.22: Representação das forças nos enrolamentos de uma bobina concêntrica (retirado de [25])

Considerando-se a secção transversal das espiras S_e e o seu número n , pode calcular-se a tensão mecânica média, a que o enrolamento fica sujeito:

$$\sigma_{médio} = \frac{F_r}{2.n.S_e} = \frac{\pi.(nI)^2.D_m}{h.n.S_e} \quad [N/m^2] \quad (2.8)$$

Relativamente aos enrolamentos internos, como foi referido são afetados por esforços de compressão, que se podem manifestar de duas maneiras. A primeira ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores localizados axialmente que apresentam maior rigidez mecânica que os condutores. Consequentemente os condutores irão apresentar uma deformação entre os suportes ao longo da circunferência do enrolamento [26]. Este tipo de falha denomina-se “*forced buckling*” e está ilustrada na Fig. 2.23 juntamente com imagens reais destas falha num transformador devido à elevada compressão radial, Fig. 2.24.

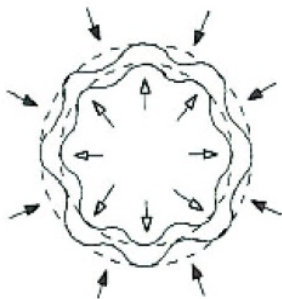


Figura 2.23: Representação das forças presentes na deformação do tipo “*forced buckling*” (retirado de [26])

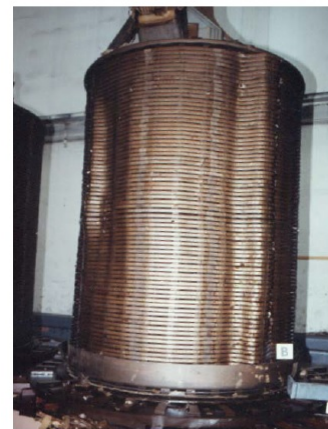


Figura 2.24: Danos causados por forças de compressão radial, do tipo “*force buckling*” (retirado de [27])

O outro tipo de deformação causada pelos esforços radiais é denominado “*free buckling*”, onde os condutores apresentam, desta vez, maior rigidez mecânica que aquela proporcionada pela estrutura de suporte. Desta forma, poderá ocorrer a projeção do condutor para dentro ou para fora da estrutura. A representação destas forças, bem como os danos num transformador real encontram-se ilustrados nas Fig. 2.25 e 2.26, respectivamente.

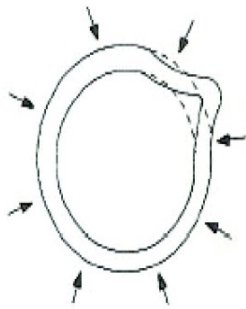


Figura 2.25: Representação das forças presentes na deformação do tipo “*free buckling*” (retirado de [24])



Figura 2.26: Danos causados por forças de compressão radial, do tipo “*free buckling*” (retirado de [28])

Podem apontar-se então algumas das principais consequências da presença destas deformações radiais em bobinas concêntricas [29]:

- Dilatação do material que reveste os condutores dos enrolamentos tornando-se extremamente prejudicial, pois a degradação deste isolamento reduz significativamente a vida útil do transformador;
- O aumento da distância entre o enrolamento interno e o núcleo, o que faz com que o transformador perca capacidade de suportar esforços mecânicos;
- Os enrolamentos começam a alargar fazendo com que os condutores ganhem alguma instabilidade, provocando vibrações e, a longo prazo, desgaste do material isolante e das ligações, reduzindo a robustez do transformador face a correntes de curto-circuito. Estes fenómenos de vibração podem ser analisados em pormenor em [30].

2.3.1.2 Forças axiais e sua origem

As forças axiais acontecem segundo a direção do eixo longitudinal das bobinas. Tendo em conta a dispersão de fluxo magnético radial, verifica-se que será nas extremidades dos enrolamentos onde, a força axial terá maior intensidade como ilustra a Fig. 2.20. Logo, a principal consequência será a presença de forças de compressão axial o que provocará deformações nos enrolamentos do transformador, como está representado na Fig. 2.27.

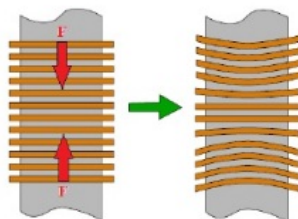


Figura 2.27: Representação das forças axiais de compressão num transformador (adaptado de [31])

A densidade de fluxo de dispersão radial B_r ocorre nas partes superiores e inferiores das extremidades das bobinas, devido à curvatura das linhas de fluxo. Daí, esta componente ao interagir com a corrente dá origem à força de direção axial F_a , que vai então incidir no sentido de comprimir ou expandir os enrolamentos. Grande parte das falhas e danos causados nos equipamentos resulta da assimetria que possa existir entre os enrolamentos, pondo em causa a integridade dos transformadores. Na Fig. 2.28 está ilustrado este deslocamento entre enrolamentos que se mostra como principal causador destas deformações [32].

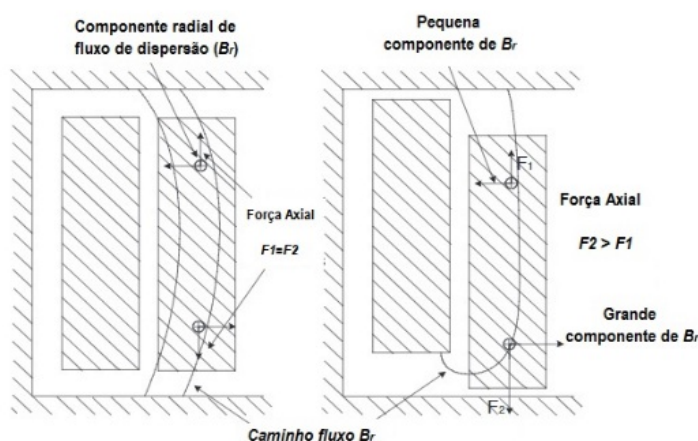


Figura 2.28: Consequência da assimetria entre enrolamentos (adaptado de [32])

Grandes forças de compressão axial nas extremidades dos enrolamentos poderão desgastar e danificar as estruturas de fixação dos enrolamentos. Estas estruturas têm como objetivo exercer uma pressão sobre os enrolamentos de modo a garantir resistência às

forças axiais, na ocorrência de correntes de curto-circuito. Também as vibrações provocadas por estas forças devem ser tidas em conta, visto que o isolamento dos condutores poderá danificar-se devido ao movimento relativo que existe entre os enrolamentos e os espaçadores localizados axialmente. Para além destas consequências dois tipos de deformações podem ocorrer quando o equipamento é afetado por forças axiais. A primeira é denominada de “*bending*” que tem por base a inclinação entre os espaçadores radiais. Por outro lado, o fenómeno resultante da inclinação existente entre os próprios condutores, denomina-se, “*tilting*”.

Cada uma destas forças pode ser estimada analiticamente tendo em conta os aspetos construtivos do transformador. As expressões 2.9 e 2.10 representam os cálculos destas deformações “*bending*” e “*tilting*”, respetivamente [24]. No segundo caso o defeito é encontrado principalmente em grandes transformadores, resultando numa inclinação dos condutores devido ao excesso de carga suportado pelos enrolamentos. A força axial é representada por F_a , L representa a distância entre os separadores axiais, e a espessura do condutor, E o coeficiente de elasticidade, h a dimensão axial do condutor, m o número de cunhas no caso da deformação por “*tilting*”. O comprimento dos espaçadores aparece representado por s , o módulo elasticidade do isolante por c e o raio do enrolamento pela constante r [33].

$$\sigma_b = \frac{F_a.L^2}{2e.h^2} \quad [N/m^2] \quad (2.9)$$

$$\sigma_{crit} = \frac{E.h^2}{14.R^2} + \frac{m.s.c.e}{12\pi.r.h^2} \quad [N/m^2] \quad (2.10)$$

Nas Fig. 2.29 e 2.30 representam-se situações reais de transformadores danificados devido à existência destas forças, causando deformações de “*bending*” e “*tilting*”, respetivamente.



Figura 2.29: Danos causados por forças de compressão axial, do tipo “*bending*” (retirado de [34])



Figura 2.30: Danos causados por forças de compressão axial, do tipo “*tilting*” (retirado de [34])

Em suma, algumas das consequências deste tipo de deformações são [31]:

- Os condutores dos enrolamentos dobram, podendo esmagar o material isolante de revestimento, reduzindo a vida útil do transformador.

- Diminuição da rigidez mecânica do disco de compressão ou até possível quebra do mesmo, o que poderá provocar deslocamentos dos enrolamentos, resultando em vibrações que reduzem a robustez do equipamento face a correntes de curto-circuito.
- Os suportes dos enrolamentos alargam, tornando-o mais vulnerável a correntes de curto-circuito.

2.3.2 Outros métodos de medida e previsão de esforços mecânicos

Os estudos até aqui referidos envolvem metodologias analíticas que representam estimativas de esforços eletromecânicos em transformadores. No entanto, uma técnica alternativa surgiu com o objetivo de resolver estes problemas recorrendo ao domínio do tempo, através de equações diferenciais. Trata-se de um método numérico com a capacidade de representar o sistema em estudo através de um conjunto de subdomínios mais simples, denominados elementos finitos. Surge, então, o Método de Elementos Finitos, em inglês, Finite Element Model (FEM).

Nesta técnica, é criada uma malha onde os elementos se encontram ligados por meio de pontos discretos, denominados nós. Esta ferramenta computacional é bastante utilizada na análise de diferentes componentes dos sistemas de energia tais como motores, geradores, transformadores, LCDS, entre outros. Tendo em conta o problema em estudo apresenta-se como uma mais valia para se determinar os campos e fluxos magnéticos no interior dos elementos finitos. Consoante o problema em estudo, este método permite simular situações reais, onde se dimensionam as diferentes variáveis em causa, permitindo prever o comportamento dos diferentes dispositivos de potência.

No âmbito do eletromagnetismo e eletromecânica há a possibilidade de serem calculadas grandezas como o vetor potencial magnético ou o potencial elétrico, permitindo no caso em estudo obter, apesar de não ser uma solução exata, uma aproximação dos valores das forças no dispositivo aquando da ocorrência de situações de falha.

As ferramentas com FEM mostra-se então como uma solução viável e a ter em conta neste âmbito de estudo que envolve o eletromagnetismo. A possibilidade de discretizar domínios utilizando geometrias complexas e a sua facilidade de aplicação mesmo quando existem condições de fronteira complicadas, tornam este método um dos mais utilizados no estudo da previsão de esforços em dispositivos de potência.

2.4 Extensometria

Uma das soluções utilizadas na medição de deformações e esforços é a extensometria. É sabido que os enrolamentos presentes nas máquinas elétricas são afetados por diferentes tipos de tensões mecânicas. No presente caso, são estudados LCDS em que os enrolamentos do secundário são formados por fitas supercondutoras havendo necessidade de

medir e estudar o comportamento e deformação a que estas estão sujeitas aquando de um curto-circuito.

Não existe a possibilidade de medir o esforço mecânico diretamente, no entanto, esta é uma grandeza que se relaciona com a deformação. Esta última pode ser calculada através da utilização de sensores que permitam obter estes valores de deformação que posteriormente são convertidos em tensão mecânica. A estes sensores dá-se o nome de extensómetros, sendo a técnica que os utiliza conhecida por extensometria.

A determinação da distribuição de tensões num componente estrutural passa pelo estudo da deformação do corpo. Todos os corpos que estão sujeitos a fenómenos mecânicos exteriores ou mesmo variações de temperatura, exibem níveis de degradação que poderão ser mais ou menos acentuados consoante a intensidade das forças envolvidas e as condições às quais foram submetidos.

Nas secções seguintes vão ser descritos conceitos fundamentais à teoria da extensometria, juntamente com os métodos analíticos subjacentes, diferenciando os tipos de extensómetros existentes e os fatores que poderão influenciar esta técnica provocando erros na leitura durante a medição. Ainda serão descritas algumas das aplicações utilizadas no âmbito da supercondutividade, especificamente, em fitas supercondutoras e como deve ser feita a escolha dos extensómetros, tendo em conta as suas características e objetivos da aplicação.

2.4.1 Extensómetros e conceitos gerais

Existem extensómetros mecânicos, óticos e elétricos. O mais conhecido e comum é o extensómetro resistivo elétrico. Estes componentes são constituídos por um material metálico que possui uma determinada resistência elétrica, a qual varia consoante a deformação aplicada. A Fig. 2.31, apresenta a configuração e os constituintes do extensómetro utilizado.

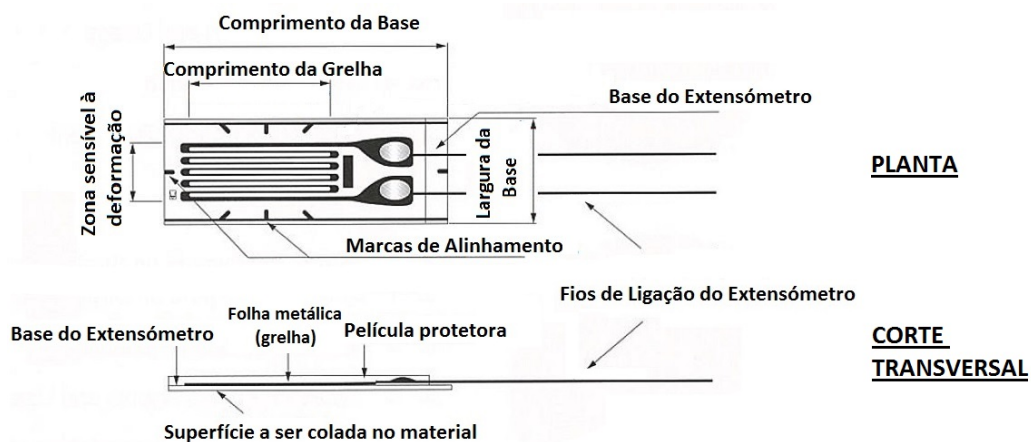
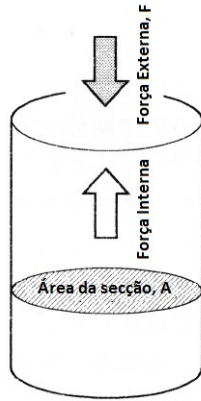


Figura 2.31: Esquema de um extensómetro (adaptado de [35])

A força aplicada num determinado objeto, tendo em conta a sua secção A , denomina-se tensão mecânica, cuja unidade é o Pascal (Pa), ou Newton/m² (N/m²), obtendo-se assim equação Eq. 2.11,



$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

Figura 2.32: Força externa exercida num objeto (adaptado de [35])

Considere-se um objeto de dimensões apresentadas nas Fig. 2.33 e 2.34, em que L representa o seu comprimento inicial, e ΔL a variação do mesmo após ter sido aplicado uma força. À relação entre a variação ΔL e o comprimento L , dá-se o nome de deformação mecânica, sendo representada por:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.12)$$

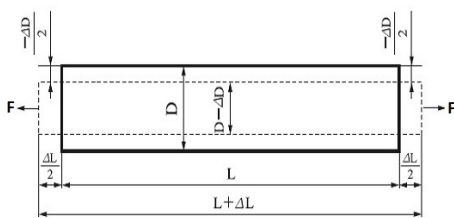


Figura 2.33: Deformação mecânica quando aplicada força de tração (adaptado de [35])

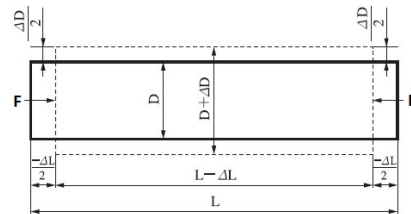


Figura 2.34: Deformação mecânica quando aplicada força de compressão (adaptado de [35])

Podem surgir duas situações, uma em que é aplicada uma força de tração ao material e outra em que há compressão. Quando a deformação tem o mesmo sentido que a força aplicada, estamos perante uma deformação longitudinal.

No entanto, no exemplo acima também se verifica uma deformação transversal, em que D representa a largura do objeto, definida por:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta D}{D} \quad (2.13)$$

Quando existe uma variação das dimensões longitudinais, a transversal irá variar inversamente. Esta relação é traduzida pelo coeficiente de Poisson, ν . Este coeficiente caracteriza o comportamento dos materiais no que diz respeito à relação entre a deformação transversal e a longitudinal, isto é, ao existir um destes tipos de deformação, dá informação sobre a proporção em que o outro irá variar. A grande parte dos materiais metálicos assumem valores compreendidos entre de 0,3 a 0,4 [36], [37]. Tem-se então, para o coeficiente de Poisson:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (2.14)$$

É necessário ter em atenção estes níveis de deformações, com o objetivo de saber até que ponto o material se poderá ou não danificar, e a capacidade que poderá ter de voltar às suas condições iniciais após ter sido aplicado o esforço. Existem então duas regiões de funcionamento. A região em que o material consegue recuperar as suas características, chamada de zona de deformação elástica e a região onde o material apresenta deformações irreversíveis, chamada de zona de deformação plástica. A Fig. 2.35, ilustra uma característica típica de um material, evidenciando estes dois comportamentos.

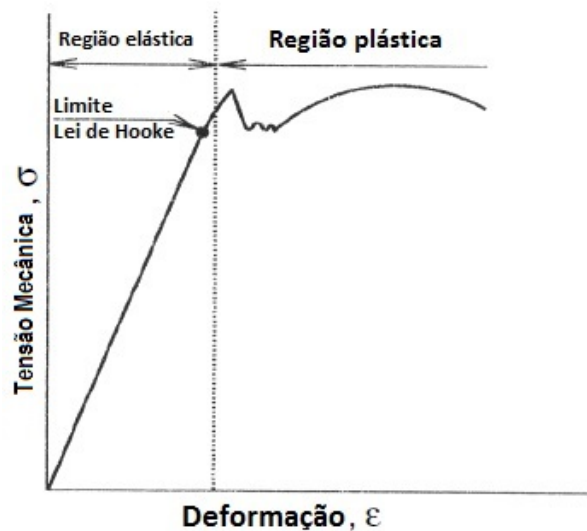


Figura 2.35: Característica mecânica de um material, ilustrando as duas regiões de funcionamento (adaptado de [35])

Verifica-se que na região elástica, o material apresenta um comportamento proporcional entre as duas grandezas apresentadas. Nesta região é possível aplicar a Lei de Hooke (Eq. 2.15), a qual relaciona a tensão mecânica com a deformação sofrida pelo material.

$$\sigma = E_y \cdot \varepsilon \quad (2.15)$$

A constante de proporcionalidade E_y presente na equação anterior é denominada de constante de elasticidade ou Módulo de Young e é característica de cada material.

Ora como os extensômetros são sensores capazes de medir deformações ε através da sua variação de resistência elétrica, e possuindo o valor desta constante, é possível calcular-se a tensão mecânica (σ) a que o material está sujeito.

2.4.1.1 Escolha do extensômetro - Características dos Extensômetros

Existe uma enorme variedade de extensômetros no mercado, cada um com as suas características e finalidade. Para que as medições e resultados consigam ser o mais fiáveis possíveis é necessário que haja uma pesquisa prévia de modo a que o extensômetro utilizado responda da melhor forma às necessidades do problema em estudo, otimizando o seu funcionamento. Para isso há que considerar alguns aspetos, dos quais se destacam os mais importantes:

- **Resistência Elétrica**

Geralmente os valores utilizados são os de 120 Ω , 350 Ω e 1000 Ω . Este valor é importante no que diz respeito à dissipação de energia por efeito de Joule. Para medições de esforços mecânicos simples os de 120 Ω são os mais utilizados, enquanto os de maior resistência direcionam-se para a utilização de transdutores.

- **Geometria**

No que diz respeito à geometria dos extensômetros, há duas medidas a ter em conta. Como ilustrado na Fig. 2.31, temos o comprimento e largura da base do extensômetro e por outro lado as dimensões da grelha. Apenas a malha de metal que constitui a grelha é sensível às deformações aplicadas, pois é a sua resistência elétrica que varia. Sendo assim, há necessidade que a área desta grelha esteja completamente colocada no material em estudo.

Ao nível de geometria ainda há que ter em atenção qual o objetivo da medição e em que direção será conveniente obter os valores da deformação, isto é, existem diferentes gamas de extensômetros, dependendo se a medida será feita uniaxialmente ou multiaxialmente. Neste segundo caso serão escolhidos extensômetro de geometria denominada *rosetas*, consoante as direções que se pretenda medir. Estes extensômetros rosetas também são utilizados para fazer medições de torção em alguns materiais. Na Fig. 2.36, estão ilustrados alguns dos exemplos referidos [35].

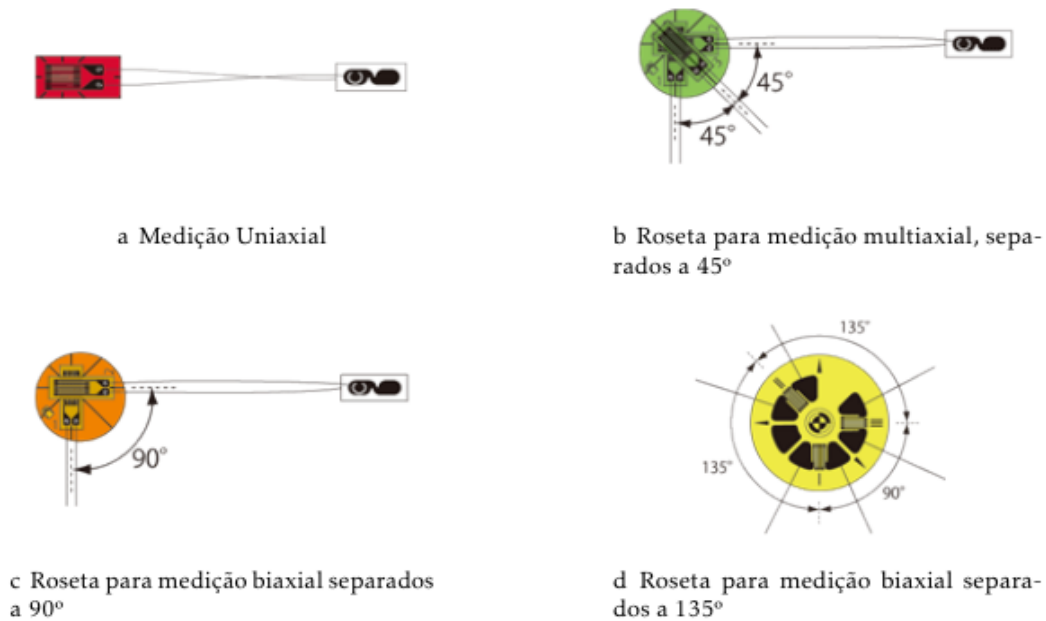


Figura 2.36: Diferentes modelos de extensómetros, consoante o objetivo da medição

- **Fator de sensibilidade e temperatura de trabalho**

O fator de sensibilidade K é uma grandeza adimensional que representa a sensibilidade do material metálico que constitui o extensómetro. Esta constante é definida pela razão entre a variação relativa da resistência elétrica deste componente e a variação relativa do comprimento do material, como descrito na Eq. 2.16. Pode ainda relacionar-se estes quocientes com a deformação medida, recorrendo à Eq. 2.12.

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \Leftrightarrow \frac{\Delta R}{R} = K \cdot \epsilon \quad (2.16)$$

De um modo geral este valor de sensibilidade assume valor ≈ 2 . A temperatura a que estes componentes trabalham influencia diretamente o valor medido, daí ser necessário ter em conta qual a temperatura de trabalho de modo a ser escolhido o modelo indicado e que consiga oferecer as medições com a maior fiabilidade possível.

2.4.1.2 Fontes de erros dos extensómetros

Uma má aplicação do extensómetro, proveniente de uma colagem ou alinhamento deficiente, fazem com que existam erros de leitura nas medições, comprometendo os valores obtidos pela extensometria. Também as grandes variações de temperatura podem afetar as medições e fazer com que os valores obtidos não correspondam à realidade.

Estes sensores são constituídos por um material metálico que possui um determinado coeficiente de expansão linear o que faz com que a própria resistência do material possa

variar dependendo de outros factores para além da verdadeira deformação medida, como por exemplo a temperatura. Este aspeto foi muitíssimo importante, pois trabalhou-se em ambiente criogénico, o que de facto impõe gamas de temperatura, muito abaixo do normal funcionamento. Sendo assim, existem extensómetros termicamente autocompensados de modo a contornar estes constrangimentos. Também dimensionando a Ponte de Wheatstone com configurações específicas consegue-se compensar estas grandes variações de temperatura. No capítulo 4, quando descrito o método aplicado, será exposta qual a configuração utilizada de modo a compensar a influência da temperatura.

A correta aplicação de um extensómetro permite desde logo uma maior garantia na qualidade dos resultados obtidos. Desde o tratamento da superfície, como o alinhamento do extensómetro, tendo em conta a direção de medida desejada, até à escolha do adesivo a utilizar. Todos estes fatores influenciam o sucesso do ensaio laboratorial, daí ter de haver alguma metodologia adjacente à correta utilização destes componentes. Na secção 3.2.1.2, estão referidos todos os cuidados a ter durante este processo.

2.4.1.3 Ponte de Wheatstone

Para calcular a tensão mecânica no material em estudo, é necessário determinar a variação da resistência do extensómetro. O valor desta variação representa a deformação a que o material foi sujeito e é representado por microstrain $\mu\epsilon$. É assim impossível utilizar um ohmímetro para proceder a estas medidas, pelo que se tem de recorrer à utilização de um circuito elétrico suficientemente sensível a estas pequenas variações, de modo a conseguir ler os valores desejados.

Este circuito é conhecido como Ponte de Wheatstone e está representado na Fig. 2.37. Foi desenvolvido por Samuel Hunter Christie em 1833, no entanto foi Charles Wheatstone quem ficou famoso com a montagem, tendo descrito o circuito dez anos mais tarde [38]. Esta montagem é constituída por quatro braços resistivos alimentados por uma fonte de tensão, com o objetivo de descobrir o valor de uma resistência desconhecida.

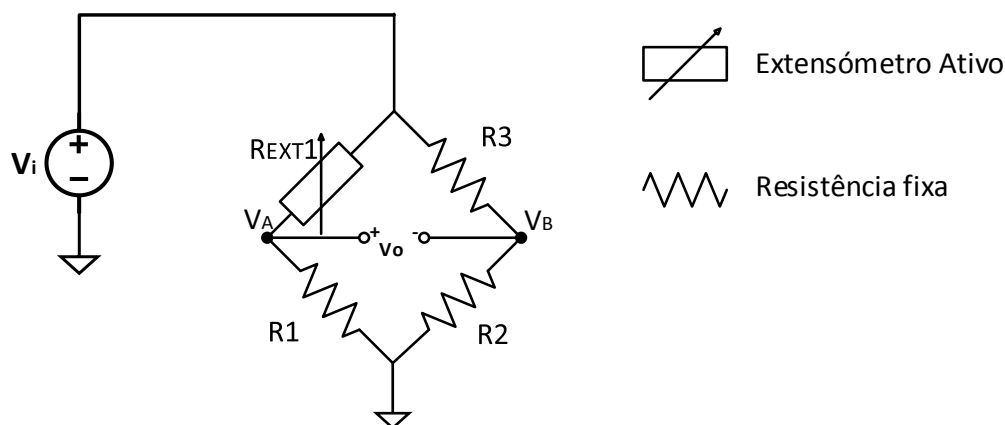


Figura 2.37: Representação do circuito ponte de Wheatstone, em que R_{EXT1} representa um extensómetro

A Ponte de Wheatstone pode ser excitada por uma fonte de tensão DC ou um sinal variável AC, no entanto, as vantagens e desvantagens de cada uma das topologias serão explicadas no capítulo 3. É necessário ter em atenção o valor de tensão com que se alimenta esta montagem para não danificar os extensómetros. Resumindo, temos um sinal de excitação V_i e um sinal de saída da ponte, V_o .

Como se verifica na Fig. 2.37, apenas o braço R_{EXT1} é constituído por um extensómetro, o qual irá sofrer a deformação, variar a sua resistência e por consequência alterar o valor da saída da ponte. Todas as restantes resistências possuem o mesmo valor, $R_1 = R_2 = R_3$. Esta configuração é denominada de *Quarter-Bridge*, podendo-se então representar analiticamente o funcionamento desta montagem, através das seguintes equações,

$$V_o = V_a - V_b \quad [V] \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} V_a = V_i \cdot \frac{R_1}{R_{EXT1} + R_1} \\ V_b = V_i \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} \end{cases} \quad (2.18)$$

Ou seja, quando R_{EXT1} não sofre qualquer deformação a saída V_o será nula, isto é, a ponte encontra-se equilibrada pois todas as resistências apresentam o mesmo valor. Esta deve ser a situação antes de se iniciar qualquer medida, para que depois de haver presença de esforço mecânico, se possa relacionar diretamente a saída da ponte com a variação sofrida pelo extensómetro. Resumindo, quando a ponte deixa de estar equilibrada, esse valor de tensão à saída dos terminais V_a e V_b representa a variação da resistência do extensómetro, daí ter-se:

$$V_o = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot V_i \Leftrightarrow V_o = \frac{1}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot V_i \quad [V] \quad (2.19)$$

Como já explicado neste capítulo, através da Eq. 2.19 obtém-se o valor da deformação sentida ε , permitindo através do Módulo de Young, chegar à tensão mecânica sentida pelo material, sendo este o principal objetivo desta dissertação.

Para além da montagem aqui apresentada, ainda existem muitas outras configurações, dependendo do objetivo do trabalho e dos resultados que se pretendem obter. A grande diferença presente nas restantes topologias assenta na quantidade de extensómetros ativos na montagem. Quando se utilizam dois extensómetros ativos teremos uma Meia-Ponte e com quatro uma Ponte de Wheatstone Completa.

Como já foi referido, estes componentes são constituídos por uma malha de um material metálico que por sua vez é caracterizado por um coeficiente de expansão linear. Sendo assim, as grandes diferenças de temperatura são uma das principais fontes de erros nas medições com extensómetros. O método mais utilizado para que se possa contornar e compensar este efeito da temperatura é a ligação em Meia-Ponte, onde teremos um extensómetro com carácter passivo (denominado *dummy*), substituindo a resistência R_3 presente no braço da ponte de sinal oposto.

Este novo extensômetro terá de ser colado a uma peça do mesmo material, a qual esteja sujeita à mesma temperatura do objeto em estudo. Desta forma, o *dummy* encontra-se sem sofrer qualquer tipo de esforço, variando a sua resistência elétrica apenas devido ao efeito da temperatura. Esta ligação permite que os valores medidos sejam independentes da temperatura.

2.4.2 Aplicações em fitas supercondutoras

O objetivo deste trabalho consiste em medir as forças a que uma fita supercondutora presente num LCDS está sujeita, em situações de falha.

Como em qualquer outro dispositivo de potência, estes materiais estão sujeitos a esforços, sendo importante saber até que ponto a integridade do material supercondutor pode estar em causa, bem como a influência destas deformações em algumas das características destas fitas.

2.4.2.1 Estudos de esforços em fitas supercondutoras 1ª Geração

Na maioria destes estudos são feitos ensaios de tração em que se pretende verificar qual a resistência mecânica destas fitas. Em 2011 fitas DI-BSCCO² desenvolvidas pela Sumitomo Electric Industries (SEI), foram submetidas a campos magnéticos intensos e a esforços de compressão ou extensão a 77K, com o objetivo de verificar qual o comportamento da densidade de corrente crítica (J_c). Depois da aplicação dos esforços, recorrendo à montagem da Fig. 2.38, utilizam-se extensômetros para medir as deformações, ensaiando-se posteriormente as fitas para determinar J_c [39].

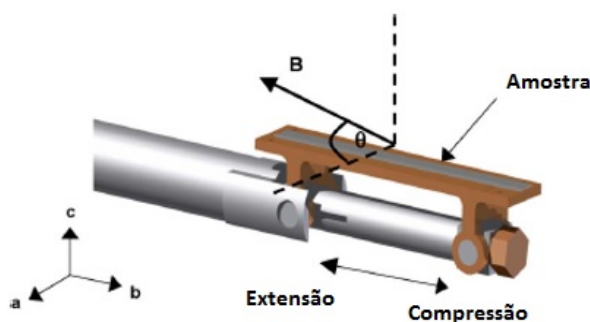


Figura 2.38: Método aplicado utilizando extensômetros (adaptado de [39])

Conseguiram com estes ensaios concluir que realmente existe uma degradação das propriedades da fita em caso de deformações de compressão, onde existe um comportamento irreversível, de modo que a fita supercondutora já não apresenta os valores de densidade de corrente crítica que possuía inicialmente. No entanto, no que diz respeito a deformações de tração, existiu reversibilidade no processo.

²Dynamically Innovative - BSCCO

Também em 1998, na Universidade de Durham, em Inglaterra, foram estudadas estas propriedades, apesar de neste caso a temperatura de trabalho ser de 4.2K e as fitas submetidas a um campo de indução magnética de 17T. Os extensómetros aplicados na fita de BSCCO revestida por camada de prata, mediram comportamentos reversíveis em deformações até 0.29%. Além deste valor as fitas apresentavam grande diminuição no valor de J_c [40].

Em 2014, outros ensaios foram feitos por investigadores japoneses, também em parceria com a Sumitomo Electric Industries, para estudar a deformação uniaxial e como esta influencia diretamente o valor da corrente crítica de fitas DI-BSCOO. Para isso, foi utilizado o mecanismo apresentado na Fig. 2.39, no qual foi aplicada uma fita supercondutora e nela colada um extensómetro. Foram aplicadas deformações de compressão e extensão, de modo a perceber qual a influência na integridade da fita [41].

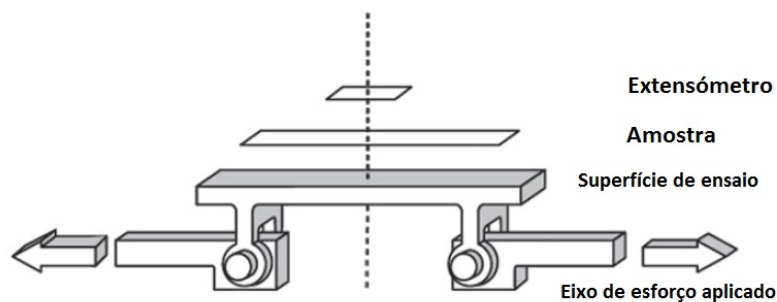


Figura 2.39: Medição de deformações em fita supercondutora DI-BSCCO, utilizando extensómetros (adaptado de [41])

Todos estes trabalhos têm uma enorme importância no estudo e desenvolvimento nas aplicações que utilizem fitas supercondutoras de 1ª geração. É extremamente importante saber quais as limitações destes materiais e que esforços poderão ter uma influência negativa no desempenho dos mesmos.

2.4.2.2 Estudos de esforços em fitas supercondutoras 2ª Geração

Na secção 2.1.3, foram referidas as duas gerações de fitas supercondutoras. Neste subcapítulo, analogamente ao anterior, serão descritos alguns dos mais importantes estudos sobre fitas supercondutoras de segunda geração. Todos estes ensaios, refletem uma enorme importância na otimização do desempenho deste tipo de materiais. É necessário haver uma constante investigação que permita criar e avaliar novas técnicas e metodologias para que se saiba qual o limite de elasticidade e possível degradação destas fitas.

Em 2007, a cargo da Universidade Nacional de Andong, Coreia do Sul, foram estudados os efeitos de deformações, utilizando uma célula de carga impondo forças até 5 kN. O mecanismo utilizado está representado na Fig. 2.40. Foram ensaiadas fitas de segunda geração com diferentes tipos de revestimento, com o objetivo de saber qual respondia com melhor desempenho. Estudaram-se os limites de tensão mecânica de cada uma das

amostras, determinando o seu limite de elasticidade e comparando-o com a degradação do $valor-n^3$ da fita utilizada. A determinação deste expoente n , relacionando-o com a degradação da corrente crítica ao longo dos ensaios, permite descrever indiretamente a irreversibilidade da I_c . [42].

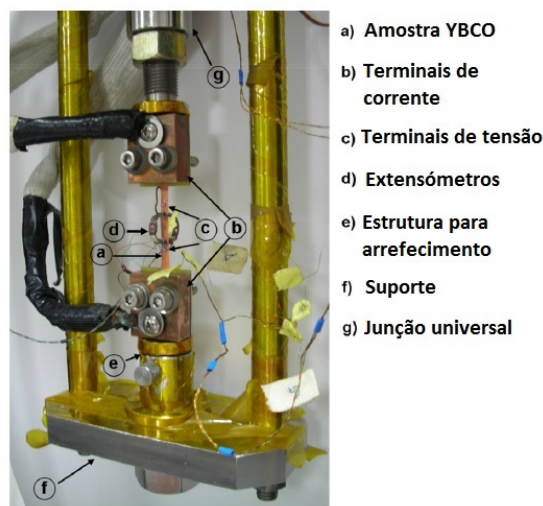


Figura 2.40: Mecanismo utilizado para aplicar forças de tração em fitas supercondutoras (adaptado de [42])

Também em 2007, foram realizados pela Universidade de Waseda, no Japão, ensaios em fita supercondutora YBCO revestida, utilizada numa bobina supercondutora de um sistema SMES⁴, foi submetida a ensaios cíclicos, onde eram aplicadas forças de compressão e tração mecânica repetidamente num ciclo de 5000 repetições, de modo a observar o comportamento sob condições de desgaste elevado. Foi utilizado o mecanismo presente na Fig. 2.40 e as deformações foram medidas através de um extensómetro colocado no centro da amostra de fita. A fita supercondutora mostrou bom desempenho, tendo sido aplicadas deformações entre 0.3% e 0.5% [43].

Para além destes testes de tensão uniaxial, outros estudos foram realizados para perceber como poderá ser afetada a densidade de corrente crítica e quais as deformações irreversíveis provocadas no material. Também as deformações por flexão são alvo de investigação, pois como referido na secção 2.3.1, apresentam-se como um dos principais esforços responsáveis por danificar inúmeros dispositivos de potência.

³Expoente da expressão da lei da potência $U(I) = U_c \cdot \left(\frac{I}{I_c}\right)^n$

⁴Superconducting Magnetic Energy Storage, em português Armazenamento de Energia Magnética por Supercondutor

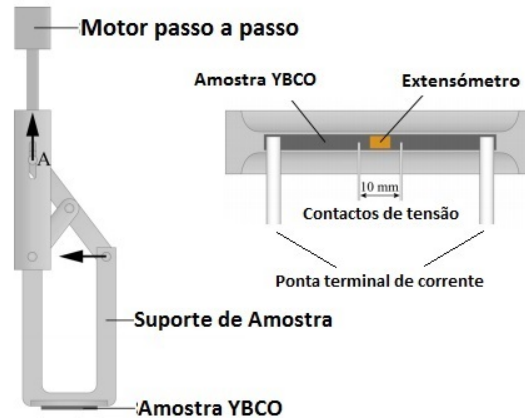
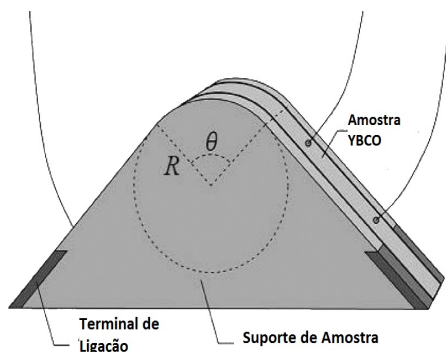


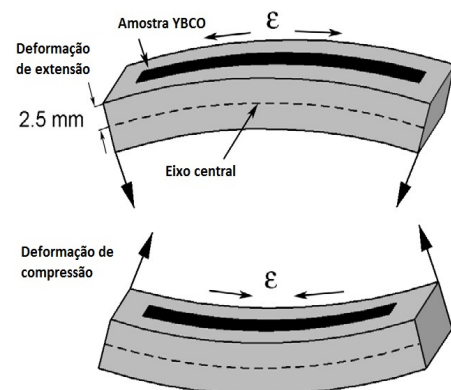
Figura 2.41: Mecanismo utilizado nos ensaios cíclicos de esforços mecânicos em fita supercondutora YBCO (adaptado de [43])

Sendo assim, diferentes metodologias são postas em prática com o intuito de medir estas deformações e poder, de alguma forma, prevenir eventuais danos nestes equipamentos. Na Fig. 2.42 estão representados diferentes métodos de medida tendo em conta situações de deformação por flexão. Na Fig. 4.3a utilizadas fitas supercondutoras de 1ª e 2ª gerações, BSCCO e YBCO, variando-se o raio de flexão com o objetivo de estudar a degradação de J_c [44].

O método presente na Fig. 4.3b foram utilizadas apenas fitas de segunda geração, com diferentes revestimentos e com diferentes dimensões (espessura e largura), de modo a estudar quais as que demonstrariam melhor desempenho. Aplicaram-se deformações de tração e de compressão, com o objetivo de perceber de que maneira cada uma delas influenciaria a integridade das fitas supercondutoras [45].



a Deformação por flexão (adaptado de [44])



b Deformação por flexão (adaptado de [45])

Figura 2.42: Diferentes métodos para medição de deformações por flexão

Ainda no estudo das bobinas supercondutoras usadas em sistemas SMES, utilizando fitas YBCO, uma equipa de investigadores Japoneses realizou um estudo a cargo da Universidade de Kyoto, com a intenção de determinar os efeitos das deformações uniaxiais, por flexão e da sua combinação. O raio de flexão foi considerado um fator importante com influência na corrente crítica e na tolerância a esforços mecânicos. O esquema representativo destes ensaios encontra-se ilustrado na Fig. 2.43. É possível detetar a utilização de extensómetros medição das deformações, quer uniaxiais, quer de flexão ou combinadas.

Foi possível concluir que um esforço de compressão, antes da flexão, consegue melhorar a resistência mecânica dos condutores YBCO. No entanto deformações de flexão-compressão afetam diretamente a densidade de corrente crítica, através do chamado efeito de deformação intrínseca ao material [46].

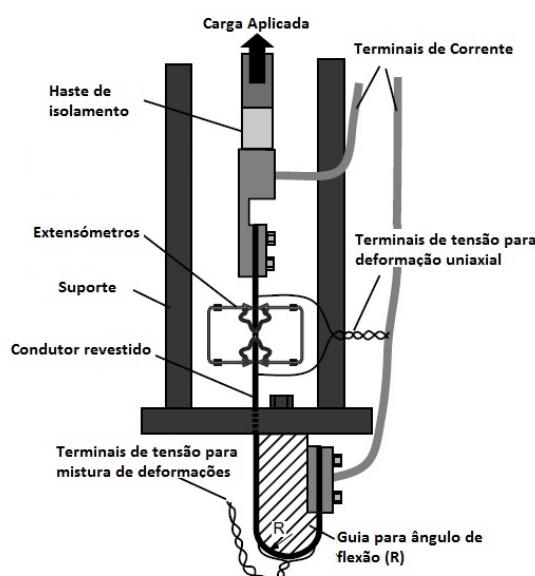


Figura 2.43: Método aplicado para estudo de deformações uniaxiais, de flexão e combinadas (adaptado de [46])

2.4.3 Síntese de capítulo

Existem diversos projetos que envolvem o uso da extensometria, comprovando que esta técnica se apresenta como um método eficaz no estudo de deformações, neste caso, em fitas supercondutoras. No entanto, estas medições envolvem gamas de tensão muito baixas e são sensíveis a algum tipo de ruído, pelo que há necessidade de uma atenção especial ao se utilizar extensómetros.

O capítulo seguinte demonstra o método aplicado para determinar as tensões mecânicas radiais e axiais presentes em fitas supercondutoras, durante a ocorrência de curtos-circuitos, juntamente com a descrição da montagem necessária e respetivos componentes.

MONTAGEM EXPERIMENTAL E MEDIÇÃO DE TENSÕES MECÂNICAS

Os LCDS durante o seu funcionamento, estão sujeitos a diferentes tensões mecânicas. Apesar de cada um ter as suas características, intensidades e diferentes repercussões, todas elas afetam negativamente o desempenho destes equipamentos, podendo mesmo em último caso, levar à sua destruição.

Uma das maiores razões de falha interna nas máquinas elétricas, está relacionada com o desgaste dos enrolamentos, resultante das vibrações causadas pelas forças eletromecânicas, produzidas, em grande parte, pelas grandes correntes de curto-circuito.

Anteriormente, algumas figuras ilustraram como os esforços radiais e axiais, presentes nos enrolamentos das máquinas elétricas, podem danificar e adulterar o seu normal funcionamento. Para isso, realizaram-se ensaios, recorrendo à análise com base na extensometria, como detalhado na secção 2.4.

Este trabalho tem como principal objetivo poder estudar, analisar e quantificar os esforços eletromecânicos desenvolvidos, num Limitador de Corrente de Defeito Supercondutor indutivo, com o objetivo de determinar as forças a que este está sujeito e se existe, durante o seu funcionamento, algum risco e/ou de degradação do equipamento.

Neste capítulo, apresenta-se e explica-se detalhadamente qual o método utilizado para conseguir obter os resultados pretendidos. Para que se consiga realizar as medições previstas, há necessidade de dimensionar dois tipos de circuitos, sendo que, um deles é referente à montagem para o ensaio laboratorial do LCDS e o segundo constituído pelo circuito elétrico utilizado no processamento de sinal e aquisição dos dados. Cada um destes circuitos possui características próprias, funções específicas e são constituídos por diversos componentes, todos eles estudados e analisados nas secções seguintes.

3.1 Montagem para ensaio do LCDS

A montagem utilizada é constituída por diferentes dispositivos, cada um com o seu objetivo e função na rede. Todos eles influenciam e fazem com que todo o funcionamento do processo seja efetuado nas condições devidas e em total segurança. Como sabemos as correntes de curto-circuito, são uma das principais causas de avarias e estragos em máquinas elétricas. Logo, pretende-se simular estas falhas, para que se possa conhecer realmente quais as forças a que estes equipamentos se encontram sujeitos. Para isso, é necessário recorrer à montagem representada na Fig. 3.1.

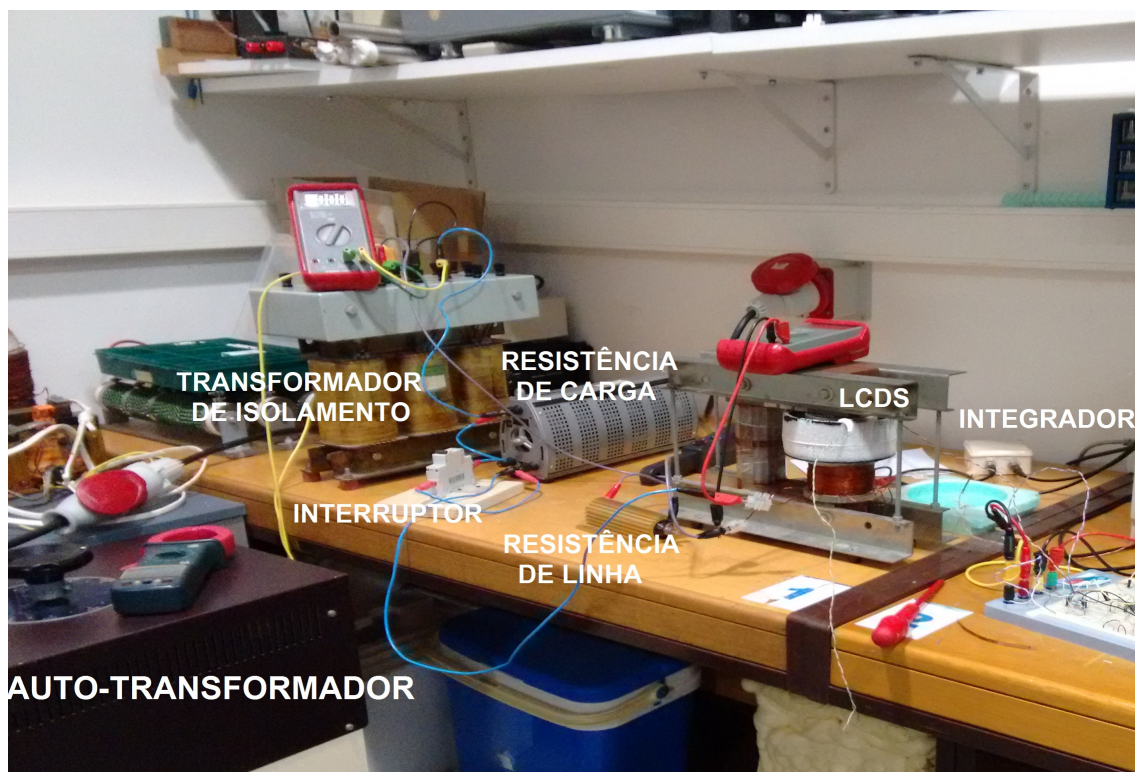


Figura 3.1: Circuito de potência utilizado nos ensaios laboratoriais

A função e objetivo de cada equipamento será descrita no capítulo 4.

O Limitador de Corrente de Defeito Supercondutor indutivo exibe um comportamento semelhante a um transformador. No entanto, neste caso, o secundário encontra-se curto-circuitado, sendo composto por uma fita supercondutora, enquanto o primário é constituído por uma bobina de cobre com 60 espiras. Em regime de funcionamento normal, o secundário é responsável por blindar o fluxo simples no núcleo, isto é, a Força Magnetomotriz do secundário faz com que se anule a FMM do primário, fazendo com que não exista tensão aos terminais do LCDS, visto não existir variação de fluxo no núcleo.

No entanto, durante o curto-circuito da carga, o facto do secundário perder as características supercondutoras, devido ao aumento do fluxo magnético acima do valor crítico, faz com que exista uma queda de tensão aos terminais, impondo uma impedância na linha e permitindo a limitação de corrente por parte do LCDS. O limitador de corrente utilizado,

foi do tipo indutivo e o protótipo anteriormente estudado e desenvolvido encontra-se ilustrado na Fig. 3.2. Este por sua vez foi colocado numa rede e sujeito a correntes de curto-circuito, impostas propositadamente para o ensaio.



Figura 3.2: LCDS indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios laboratoriais

Nos subcapítulos seguintes será descrito como foram dimensionados alguns destes componentes e grandezas, bem como uma breve descrição da configuração do LCDS. A função dos restantes componente será referida durante o procedimento experimental, no próximo capítulo.

3.1.1 Dimensionamento do circuito - Resistência de linha e resistência de carga

Antes de serem realizados quaisquer ensaios há necessidade de se estipular algumas grandezas importantes, sendo uma delas o dimensionamento da carga. Para isso, tendo em conta as correntes envolvidas nos dispositivos e sabendo a tensão a aplicar poderá realizar-se este cálculo. A tensão aplicada, juntamente com a resistência de carga influencia a corrente que irá ser imposta aos dispositivos, e para que não haja qualquer tipo de danos, há que ter em conta as capacidades destes equipamentos, de modo a não pôr em risco os materiais em estudo, evitando ultrapassar valores de corrente e tensão aconselhados.

O dimensionamento foi feito recorrendo a cálculos simples envolvendo teoria de circuitos elétricos. Na Fig. 3.3, encontra-se o circuito equivalente à montagem utilizada, que permitiu chegar aos valores utilizados, onde R_L representa a resistência de linha e R_C a resistência de carga.

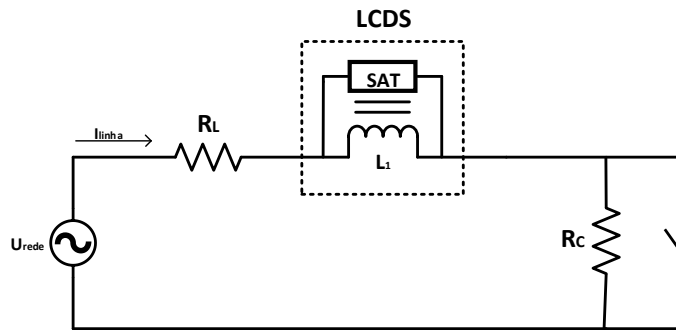


Figura 3.3: Esquema equivalente da montagem utilizada nos ensaios laboratoriais

Em primeiro lugar, calcula-se qual a corrente máxima admitida pelo primário do LCDS, recorrendo à relação de transformação entre as correntes do primário e do secundário. A corrente crítica da fita supercondutora YBCO que constitui o secundário, é de $I_s = 100$ A e o primário possui, como já foi referido, $N_p = 60$ espiras, logo:

$$N_p \cdot i_p = N_s \cdot I_s \Leftrightarrow 60 \cdot I_p = 1 \cdot 100 \Leftrightarrow I_p = 1,66(6) \text{ A} \quad (3.1)$$

Deve-se encontrar agora uma tensão a aplicar ao circuito, de modo a que estes limites sejam respeitados, não havendo risco de causar qualquer dano ao equipamento em causa. Para isso decidiu-se usar como referência, 80% deste valor de corrente, com o objetivo de proteger e preservar a fita supercondutora. Assim obtém-se, como valor de corrente a ser usada, $i_p = 1,33$ A .

O Limitador de Corrente de Defeito Supercondutor, em regime normal, não impõe qualquer impedância na rede, sendo assim invisível a esta. Nestas condições, a corrente na linha deverá exclusivamente depender da fonte de tensão e das resistências de linha e de carga, R_L e R_C , respetivamente. Logo, em ausência de falha tem-se circuito simplificado, apresentado na Fig. 3.4

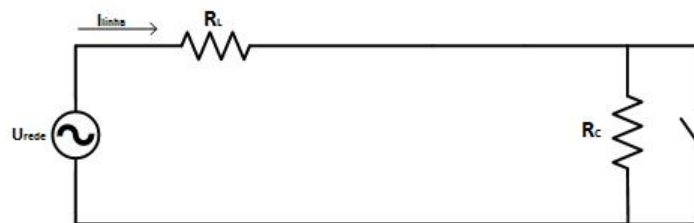


Figura 3.4: Esquema simplificado da montagem em regime normal

Recorrendo à Lei de Ohm e sabendo que $R_L = 1 \Omega$, para que a corrente na linha não ultrapasse os 1,33 A e assumindo uma tensão de entrada máxima, aplicada pelo autotransformador, de 80 V (56 V_{ef}) , calcula-se o valor da carga a ser utilizada para que estas condições sejam estabelecidas,

$$1 + R_c = \frac{U_{fonte}}{I_{linha}} \Leftrightarrow R_c = \frac{80}{1,33(3)} - 1 \Leftrightarrow R_c \approx 59 \, \Omega \quad (3.2)$$

Utilizando uma resistência variável com capacidade para responder a estas necessidades, regula-se o seu valor para $\approx 59 \, \Omega$, de modo que a corrente na linha não ultrapasse o valor anteriormente definido. Estes serão os valores usados nos ensaios laboratoriais.

3.1.2 Limitador de corrente de defeito supercondutor

Na Fig. 3.2, foi utilizado um protótipo de limitador indutivo constituído, à semelhança de um transformador, por um núcleo ferromagnético, um primário e um secundário. Em regime normal, este equipamento blinda magneticamente o seu núcleo, pois como se viu, o secundário ao se encontrar curto-circuitado, faz com que as FMM se anulem, fazendo com que não haja penetração de fluxo no núcleo. No entanto, quando ocorrem situações de falha, os curto-circuitos na linha provocam um aumento da corrente no supercondutor, fazendo-o perder características supercondutoras, tornando-o resistivo, deixando de conseguir blindar o núcleo como pretendido. A existência de fluxo no ferro aumenta a impedância do circuito primário, provocando a limitação da corrente na linha.

O núcleo ferromagnético presente na Fig. 3.2 é formado por 106 chapas com 0,5 mm de espessura de aço elétrico de grão não orientado, fixas e suportadas pela mesma estrutura metálica, onde estão colocados o primário e o secundário.

O primário é constituído por enrolamentos de fio de cobre nú, com secção $1,5 \, \text{mm}^2$. Foi utilizado um enrolamento de 60 espiras, assente num suporte de acrílico para que ficasse devidamente aplicado e estável. Ainda neste suporte, existe um enrolamento de fio de cobre nú, com secção $0,5 \, \text{mm}^2$, utilizado durante os ensaios, para fazer as leituras de fluxo magnético no núcleo, permitindo comparar e ter em conta diferentes fatores que pudessem afetar e influenciar a existência das forças medidas.

No enrolamento secundário foram utilizadas fitas supercondutoras, curto-circuitadas, em forma de anel, suportadas por moldes em Celeron. Estes moldes são escolhidos por terem ótimas propriedades térmicas e mecânicas, tendo em conta as baixas temperaturas a que são submetidos. O seu baixo coeficiente de expansão térmica, idêntico ao do SC, faz com que se torne a melhor escolha nesta aplicação.

3.2 Circuito para aquisição de dados

Após estabelecer a montagem para o ensaio do LCDS, é necessário medir quantitativamente as tensões mecânicas (radiais e axiais) a que os enrolamentos do LCDS estão sujeitos, numa situação de curto-circuito.

Como explicado na secção 2.3.1, as forças eletromagnéticas são as principais responsáveis por danos causados a dispositivos de potência e neste caso, os fluxos de dispersão radiais e axiais, influenciam os esforços com direção axial e radial, respetivamente. A extensometria, também anteriormente detalhada, mostra-se como uma boa solução para

o problema em estudo. Neste subcapítulo, apresentar-se-á todo o processamento do sinal, bem como a obtenção do valor das deformações por parte dos extensómetros.

Na secção 2.4, foi exposto o processo de funcionamento dos extensómetros, concluindo-se que é um componente que permite medir deformações nos materiais (ε) através da sua variação de resistência.

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot K \quad (3.3)$$

De modo a realizar este tipo de medições, é necessário recorrer ao uso de um circuito elétrico específico, denominado ponte de Wheatstone, que se encontra igualmente ilustrada na Fig. 2.37.

No entanto, para se conseguir trabalhar, adquirir e analisar todos estes valores de deformações, há necessidade de implementar um circuito onde, sequencialmente, se amplifica, desmodula e filtra o sinal finalizando com a aquisição do mesmo pela placa modelo NI-6008, da *National Instruments*. Na Fig. 3.5 representa-se o circuito elétrico necessário aos ensaios efetuados.

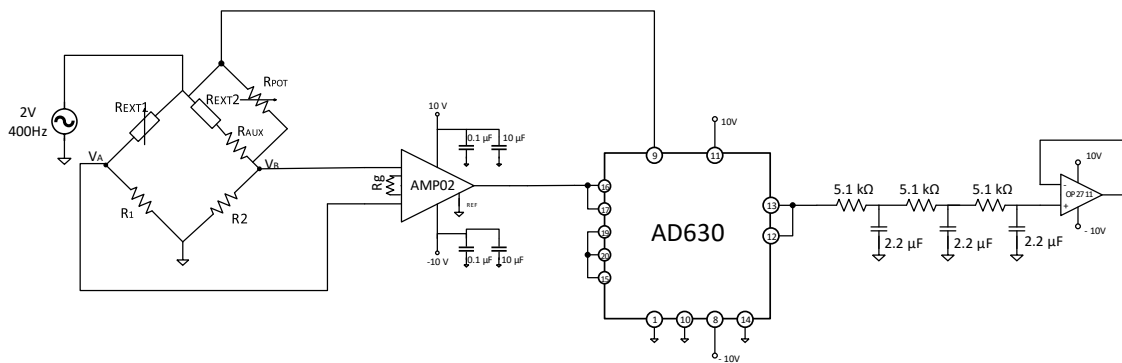


Figura 3.5: Esquema do circuito elétrico utilizado para processamento do sinal referente à deformação medida

3.2.1 Bloco 1 : Ponte de Wheatstone e amplificação do sinal

Neste primeiro bloco, recorre-se à utilização de extensómetros para medição destas deformações, de modo que houve necessidade de dimensionar um circuito, denominado Ponte de Wheatstone.

A ponte de Wheatstone, permite determinar a variação de uma das suas resistências, que por sua vez, pode ser relacionada, com uma deformação ε . Esta ponte, indicada na Fig. 3.6, é constituída por quatro resistências, sendo que duas delas serão extensómetros, e apenas a R_{EXT1} irá variar consoante a força aplicada. Isto é, utiliza-se uma configuração de *Quarter-Bridge*, onde apenas este braço da ponte será afetado pela tensão aplicada na fita. As grandes variações de temperatura, devido ao ambiente criogénico, fazem com que seja necessário existir R_{EXT2} , que tem um papel muito importante na compensação

de temperatura. O segundo braço da ponte representado por R_{EXT2} , é constituído não só por um segundo extensómetro essencial para a compensação de temperatura, mas também por uma resistência em série R_{AUX} que permite o ajuste correto por parte do potenciômetro R_{POT} .

As resistências R_1 e R_2 representam duas resistências de precisão com valor 120Ω .

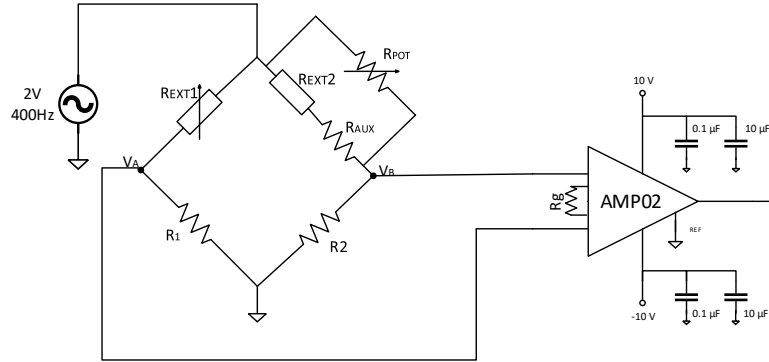


Figura 3.6: Bloco 1 do circuito elétrico utilizado

Ora sabendo que a resistência de um material se altera com as variações de temperatura, utiliza-se este segundo extensómetro com a função de equilibrar a ponte, ou seja, inicialmente, antes de existir qualquer tipo de deformação, é fundamental que a ponte se encontre equilibrada, com tensão de saída aos seus terminais igual a zero. Para isso, o extensómetro presente em R_{EXT2} , é designado de *dummy gauge*, elemento passivo da ponte, que é utilizado com o objetivo de compensar estas variações bruscas de temperatura.

Este componente passivo, para que desempenhe a sua função corretamente, deve ser exatamente igual ao extensómetro ativo R_{EXT1} e deve permanecer à mesma temperatura, relaxado, sem sofrer qualquer tipo de deformação. Sabendo que o braço 1 da Ponte, tem sinal positivo, a série R_{EXT2} com R_{AUX} deve ser ligado no braço com sinal simétrico, como indicado na Fig. 3.6. A Fig. 3.7, ilustra este extensómetro, permanecendo em ambiente criogénico, sem qualquer tipo de deformação, de modo a que:

$$R_{EXT1} \cdot R_2 = (R_{EXT2} + R_{AUX}) \cdot R_1 \quad (3.4)$$

Ao mergulhar os extensómetros no azoto líquido, antes de dar início aos ensaios, nem sempre se consegue obter a igualdade representada na Eq. 3.4, o que faz com que a tensão à saída da Ponte de Wheatstone não possua valor zero. Também o facto de o extensómetro estar colado na fita, como se mostra nas Fig. 3.9 e 3.10, faz com que este já possua uma deformação inicial.

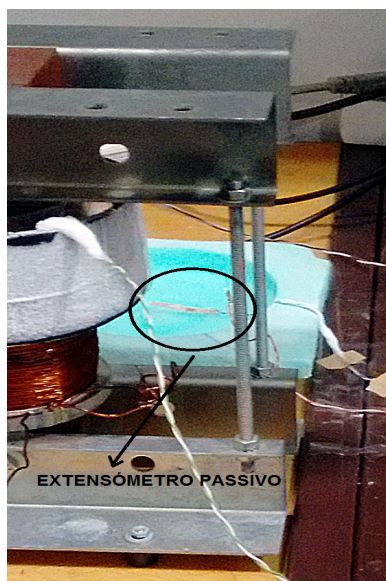


Figura 3.7: Extensômetro passivo para compensação de temperatura. Colocado em azoto líquido sem qualquer deformação

De modo a minimizar este problema, utiliza-se um potenciômetro, representado na Fig. 3.6, como R_{POT} , em paralelo com o segundo braço da ponte, com o objetivo de poder equilibrar e acertar a ponte.

Isto funciona, porque ao alterarmos manualmente o valor do potenciômetro, o braço 2, isto é, R_{EXT2}/R_{POT} , vai assumir o valor necessário para que, analisando o sinal no osciloscópio, se consiga obter tensão aproximadamente nula. É essencial alcançar este valor, para que à saída do circuito final, a tensão analisada seja de facto o módulo referente à força sentida pelo extensômetro.

Depois de alcançadas estas condições de equilíbrio, pode ser iniciado o ensaio laboratorial descrito no capítulo 4.1.

3.2.1.1 Excitação da ponte DC vs AC

A saída da Ponte de Wheatstone é proporcional à variação de uma das suas resistências. No entanto, a escolha do sinal de excitação da ponte tem de ser ponderada, tendo em conta as condições, objetivos e particularidades do ensaio e das forças que se pretendem medir.

O facto de existirem grandes variações de temperatura, faz com que exista um ruído acrescido e distorção do sinal, que, comparativamente às amplitudes em causa, sendo sinais de gamas muito baixas, vão ser significativos.

A utilização de um sinal AC, possui uma maior sensibilidade e melhor rejeição de ruído. Tem como principal vantagem eliminar as componentes inerentes à excitação DC, fazendo com que se previna todo o *offset* que poderia comprometer o valor real de tensão a medir.

As medições efetuadas com extensómetros estão sujeitas à presença de ruídos pertencente à própria linha, *offset drifts* e ruído de Flicker¹, daí a melhor solução para prevenir todas estas limitações será recorrer à excitação com sinal AC.

Também a amplitude e a frequência do sinal de entrada são aspectos fundamentais a ter em conta. Quanto à amplitude, na gama dos extensómetros de 120 Ω , não é aconselhável ultrapassar os 3 V, devido ao valor máximo de dissipação de energia que estes componentes possuem, daí ter sido utilizado um sinal de 4 V pico-a-pico e 400 Hz de frequência [47].

3.2.1.2 Resistências e extensómetros - Escolha dos modelos corretos

Quando se recorre à medição de deformações com extensómetros, é necessário considerar qual o modelo mais adequado, tendo em conta as condições de trabalho onde se realizam as medições. Na secção 2.4.1.1, encontram-se mencionados alguns dos modelos existentes, onde se destacam as principais características, como a sua dimensão (largura e comprimento), resistência, coeficiente de expansão linear, fator de sensibilidade e temperatura a que poderá estar sujeito. A característica mais importante que definiu a escolha do modelo KFL da empresa Kyowa Electronic Instruments, foi o facto de poder ser utilizado a temperaturas entre os -196 °C até 150 °C. Isto é, tendo em conta que os extensómetros seriam aplicados numa fita supercondutora e trabalhando esta em ambiente criogénico, apenas esta gama de temperaturas respondia às necessidades, daí ter sido este modelo o escolhido.

No entanto, para além deste fator, também as dimensões têm que ser consideradas, visto que a fita onde o extensómetro é aplicado, tem largura de apenas 4 mm. Sendo assim, estes componentes apenas sentem as deformações dentro da área da sua malha metálica, logo o modelo da Kyowa escolhido foi:

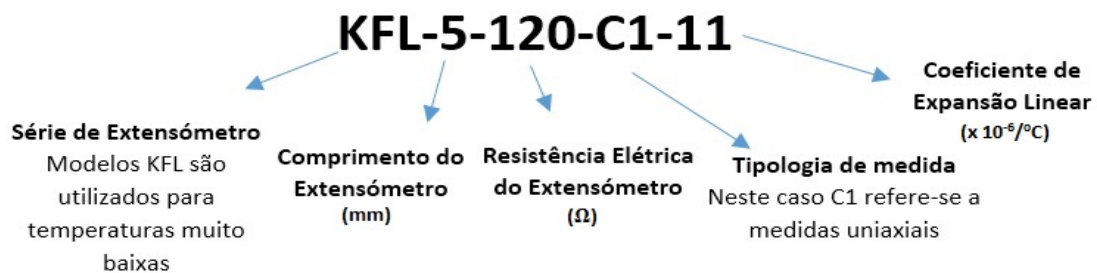


Figura 3.8: Modelo do extensómetro utilizado nos ensaios laboratoriais

O objetivo deste trabalho consiste na medição de esforços eletromecânicos num LCDS monofásico Indutivo, durante situações de curto-circuito, mais propriamente, das tensões mecânicas axiais e radiais presentes no secundário deste dispositivo, o qual é constituído

¹ Sinais cujo espectro de potência do sinal é dado por $S(f) \propto \frac{1}{f^a}$ onde f é a frequência com $0 < a < 2$.

CAPÍTULO 3. MONTAGEM EXPERIMENTAL E MEDIÇÃO DE TENSÕES MECÂNICAS

pela fita supercondutora YBCO SCS4050 da Superpower ou de primeira geração de Bi-2223 da InnoST.

Para isso, os extensómetros têm de ser aplicados na superfície da fita, em posições que permitam a medição das deformações nas direções pretendidas. Nas Fig. 3.9 e 3.10, consegue observar-se o diferente posicionamento na direção axial e radial, respetivamente.



Figura 3.9: Extensómetro colocado para medição dos esforços axiais



Figura 3.10: Extensómetro colocado para medição dos esforços radiais

Os extensómetros devem ser aplicados utilizando adesivos próprios, baseados em cianoacrilato. Existe uma grande variedade deste tipo de adesivos, mas analogamente à escolha dos extensómetros, tem de se ter em conta o ambiente criogénico em que se vai trabalhar, daí ter sido escolhido, também da empresa Kyowa, o adesivo CC-33A, representado na Fig. 3.11, que pode ser utilizado numa gama de temperaturas de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.11: Adesivo CC-33A utilizado na aplicação dos extensómetros

Na utilização deste adesivo é necessário ter em atenção três fatores importantes aspetos:

- **Tratamento da superfície** – A superfície onde é aplicado o adesivo deve ser previamente tratada, polida utilizando uma lixa e limpa com álcool etílico de maneira a serem retiradas todas as impurezas presentes na fita supercondutora.
- **Alinhar o extensómetro** – Para que as medições sejam coerentes e que os valores obtidos representem as direções axiais e radiais, há que ter em atenção o facto de o extensómetro ser colocado sobre a fita, perfeitamente alinhado. Ou seja, primeiro coloca-se uma gota do adesivo, de maneira a que este preencha toda a área que extensómetro ocupe, e este último, deve ser colocado perpendicular ou paralelamente consoante a direção que se quer estudar, como se pode verificar nas Fig. 3.9 e 3.10.
- **Aplicação e utilização** – Após alinhamento do extensómetro sobre a superfície da fita, é necessário que este seja pressionado com o dedo, durante cerca de 60 segundos, utilizando para cobrir um pedaço de plástico próprio, protegendo os dedos da cola. Por fim, deixar o material repousar durante 1h às condições ambientes. No entanto, é aconselhável aguardar um período de 24h antes de fazer qualquer tipo de medição, para que os resultados obtidos possam ser os mais fiáveis possíveis, tendo em conta a temperatura a que se vai trabalhar.

Por fim, já com o extensómetro devidamente alinhado e colado na superfície da fita, é necessário proceder à ligação dos terminais deste componente com o restante circuito elétrico. Ou seja, como se verifica nas Fig. 3.9 e 3.10, recorreu-se à utilização de pequenas peças de cobre que ligam as extremidades dos extensómetros a fios de cobre com secção $1,5 \text{ mm}^2$, que por sua vez serão ligados à placa de ensaio nos respetivos locais, completando assim a Ponte de Wheatstone, ilustrada na Fig 3.6.

Cumprindo todas estas fases, podem iniciar-se ensaios experimentais, explicados posteriormente nesta dissertação.

3.2.1.3 Amplificador utilizado

Analizando a Fig. 3.6, verifica-se que existem dois nós situados entre os extensômetros e as resistências de precisão de 120Ω . O sinal que se encontra em cada um dos nós é respetivamente, onde V_i é o sinal de excitação da ponte:

$$\begin{cases} V_a = V_i \cdot \frac{R_2}{R_{EXT1} + R_2} \\ V_b = V_i \cdot \frac{R_{EXT2}}{R_3 + R_{EXT2}} \end{cases} \quad (3.5)$$

A saída da ponte será descrita por $V_a - V_b$. Como numa situação de equilíbrio R_{EXT1} e R_{EXT2}/R_{POT} têm o mesmo valor, mede-se tensão nula a estes terminais. No entanto, quando acionado o curto-circuito, o valor de R_{EXT1} vai variar, consoante a força seja de expansão ou compressão, isto é, a resistência irá aumentar no primeiro caso e diminuir no segundo. Sendo assim, caso exista uma extensão, teremos $V_a > V_b$, logo o sinal de saída, será um sinal positivo e vice-versa.

Quando utilizada a técnica de extensometria, estes valores situam-se nas microdeformações $\mu\epsilon$ e daí como descrito na Eq. 3.3, o valor de ΔR , resulta em microohm $\mu\Omega$, pelo que a diferença $V_a - V_b$, será medida por sua vez em microvolt μV .

A existência de tensões tão reduzidas, em conjunto com algum ruído existente na própria placa de ensaio, *offsets* inerentes aos componentes presentes na montagem, bem como toda a cabelagem utilizada, dificulta a medição e obtenção de valores, fazendo com que se torne difícil decifrar qual a tensão representativa das forças aplicadas. Para colmatar esta situação é necessário recorrer à utilização de um amplificador de instrumentação, que tem como principal objetivo permitir a análise do sinal à saída da ponte.

Após alguma pesquisa, concluiu-se que o amplificar ideal para esta montagem é o AMP02 da Analog Devices, cujo esquema está representado na Fig. 3.12. Este amplificador, tem como principais características, o seu reduzido *offset*, uma grande capacidade de rejeição de ruído de modo comum, bem como um enorme grau de precisão, quando se trabalha nesta gama de valores de tensão, apresentando ainda um ganho variável, controlado pelos terminais R_G , com a possibilidade de alcançar valores, desde 1 a 10.000. Este ganho é definido pela Eq. 3.6 tendo sido utilizado na montagem uma resistência de valor $R_G = 50 \Omega$, para que se usufruísse ganho de ≈ 1000 , valor mais adequado aos ensaios pretendidos.

$$G = \frac{V_{OUT}}{(+IN) - (-IN)} = \left(\frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \right) + 1 \quad (3.6)$$

O sinal à entrada da Ponte de Wheatstone V_i , é uma onda sinusoidal de amplitude 2 V e frequência 400 Hz. Sendo assim, o sinal de saída deste amplificador será um sinal também sinusoidal, com frequência idêntica ao sinal V_i , cuja amplitude irá ser proporcional à diferença $V_a - V_b$, multiplicada pelo ganho respetivo. Quanto maior a deformação medida, maior a variação do valor de R_{EXT1} e por consequência maior amplitude terá o sinal à saída do Bloco 1.

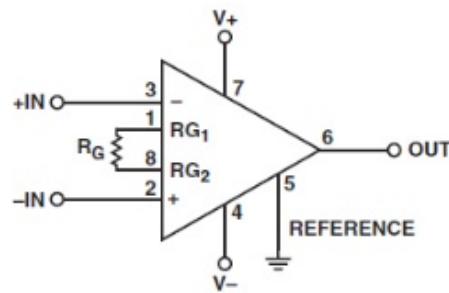


Figura 3.12: Esquema do AMP02

3.2.2 Bloco 2 : Desmodulação e filtragem do sinal

O segundo bloco tem como principal objetivo traduzir a deformação sentida pelo extensômetro, num sinal DC, que se possa relacionar com a força aplicada.

Esta secção do circuito é constituída por um modulador/desmodulador AD630, da Analog Devices, um filtro RC passa-baixo de terceira ordem e um amplificador operacional OP2177, também da Analog Devices. Todos estes componentes estão ilustrados na Fig. 3.13.

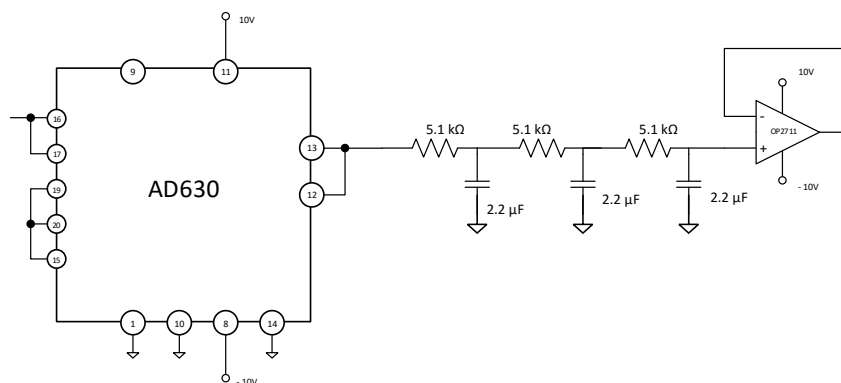


Figura 3.13: Bloco 2 do circuito elétrico utilizado

O AD630 é a melhor escolha no que diz respeito a manipulações de sinais provenientes de pontes com excitação AC. É um modulador/desmodulador, com ganhos controláveis de enorme precisão, assumindo valores de 1, 2, 3 ou 4 e capaz de recuperar sinais até 100 dB de ruído. Mais informações e características acerca deste modelo podem ser consultadas em [48]. O terminal R_B do desmodulador, encontra-se ligado à terra, impondo um ganho de 2 ao sinal processado, o que influenciará os cálculos posteriormente apresentados.

Sabe-se que a excitação recorrendo a sinal AC, oferece muitas vantagens no que diz respeito a atenuação de ruídos. O sinal de saída do AMPO02 é agora amplificado e seguidamente desmodulado por este bloco. Resulta então um sinal que sofre uma retificação de onda completa por parte do AD630 o que nos permite, utilizando um filtro passa baixo

obter um sinal DC diretamente relacionado com a deformação medida pelo extensômetro. Esta retificação, verificada na Fig. 3.14 é calculada por um fator de $\frac{2}{\pi}$.

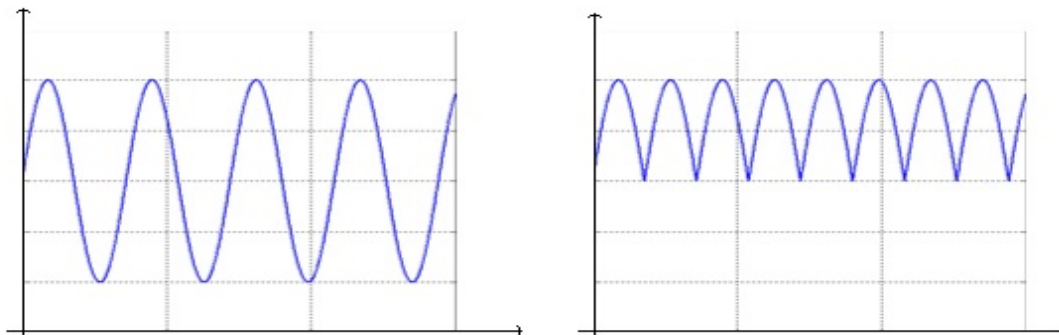


Figura 3.14: Sinal antes e após a retificação

Como se verifica, há necessidade de filtrar o sinal retificado para que se encontre um sinal DC referente à força aplicada. Este filtro, ilustrado na Fig. 3.13, é constituído por três pólos, com frequência de corte ≈ 15 Hz [47]. Este dimensionamento oferece uma maior atenuação a frequências mais altas o que nos permite obter um sinal praticamente DC, apesar de algum ruído inerente à montagem, mas que não se mostra significativo comparativamente às amplitudes medidas nesta fase do processo.

O amplificador utilizado no final do circuito, é também designado seguidor de tensão, isto é, possui ganho unitário, isolando as diferentes gamas de impedância, acoplando-as e mantendo um ganho de potência estável. O OP2177, apresenta *offset* e consumo de potência praticamente desprezável, bem como uma grande precisão quando utilizados condensadores acima dos 1000 pF.

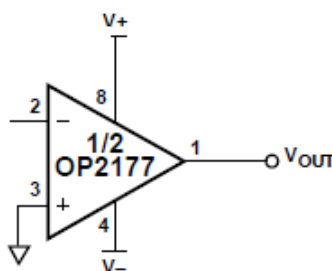


Figura 3.15: Esquema do OP2177

3.2.3 Bloco 3 : Aquisição digital do sinal

Para se analisar corretamente o sinal DC gerado à saída do amplificador OP2177 é necessário recorrer à utilização de uma placa de aquisição de dados, neste caso, a placa da National Instruments, NI-6008. Possui 8 entradas analógicas single-ended com resolução de 12 bits. Trabalha numa faixa máxima de tensão de ± 10 V, tendo uma sensibilidade

de ≈ 7 mV , o que permitiu sem qualquer problema obter e analisar o sinal de tensão criado. Tem 2 canais de saída, também com 12 bits, conseguindo alcançar uma taxa de atualização de 150 amostras/s.

Foram utilizados cinco dos oitos canais disponíveis, cada um focado na obtenção de um determinado tipo de sinal, desde a tensão referente à deformação aplicada, como a corrente presente na linha do circuito de potência ou na espira do supercondutor, bem como o fluxo ligado com o primário. Todos os canais e respectivas valores detetados estão presentes na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Canais utilizados pela placa NI-6008 e respectivas grandezas

CANAIS	MEDIDAS
CANAL 0	Esforços mecânicos
CANAL 1	Fluxo ligado com o enrolamento primário
CANAL 2	Corrente de Linha
CANAL 3	Esforços mecânicos
CANAL 4	Corrente na Espira

O facto da resistência de linha R_L assumir valor de 1Ω , permitiu medir a corrente na linha, sabendo o valor da tensão aos seus terminais. Por outro lado, a corrente na espira foi medida recorrendo à utilização de uma bobina de Rogowski. Esta bobina, como representado na Fig. 3.16, é colocada em torno da espira e por sua vez ligada a um circuito retificador ativo de ganho $G \approx 90$, permitindo então a leitura da corrente que a percorre.

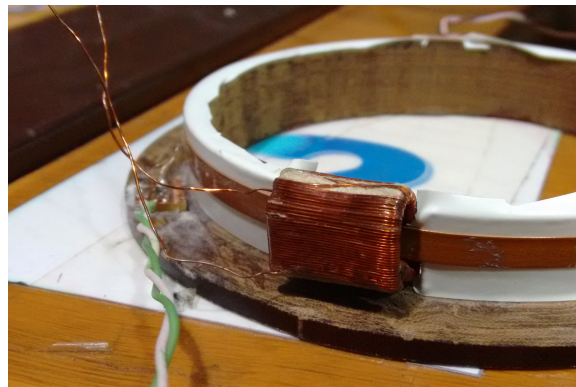


Figura 3.16: Bobina de Rogowski aplicada a fita supercondutora para medição da corrente na espira

Com o objetivo de obter e analisar individualmente todos estes sinais lidos pela placa NI-6008, utiliza-se o programa NI Signal Express 2013, que nos permite escolher quais os valores de interesse e assim proceder à gravação da informação assim que é iniciado o ensaio laboratorial. A gravação começa segundos antes do curto-circuito ser aplicado, podendo assim detetar o andamento da tensão à medida que as forças são aplicadas, até se alcançar completamente a situação de relaxamento.

Todos os dados presentes na Tabela 3.1, são copiados e tratados através de ferramentas presentes no programa Matlab. Esta análise e tratamento de dados permite-nos estudar o

comportamento dos esforços eletromecânicos no LCDS.

3.2.4 Fluxograma – Processo de processamento do sinal

O diagrama ilustrado na Fig. 3.17, representa todo o processo acima detalhado, onde se pode observar o andamento e transformações do sinal, desde o gerador de funções, sinal de excitação AC, até à saída do filtro, sinal DC referente à tensão mecânica sentida pela fita supercondutora. Em cada uma das figuras, estão reproduzidos os diferentes estágios inerentes ao processamento e tratamento do sinal, tendo em conta as duas situações possíveis, havendo ou não ocorrência de falha, neste caso correntes de curto-circuito, o que resultará na existência ou não de esforços aplicados à fita supercondutora, respetivamente. O sinal retificado presente nestes fluxogramas corresponde apenas a um instante de força, que sendo calculado ao longo de todo o curto-circuito, resulta no gráfico final.

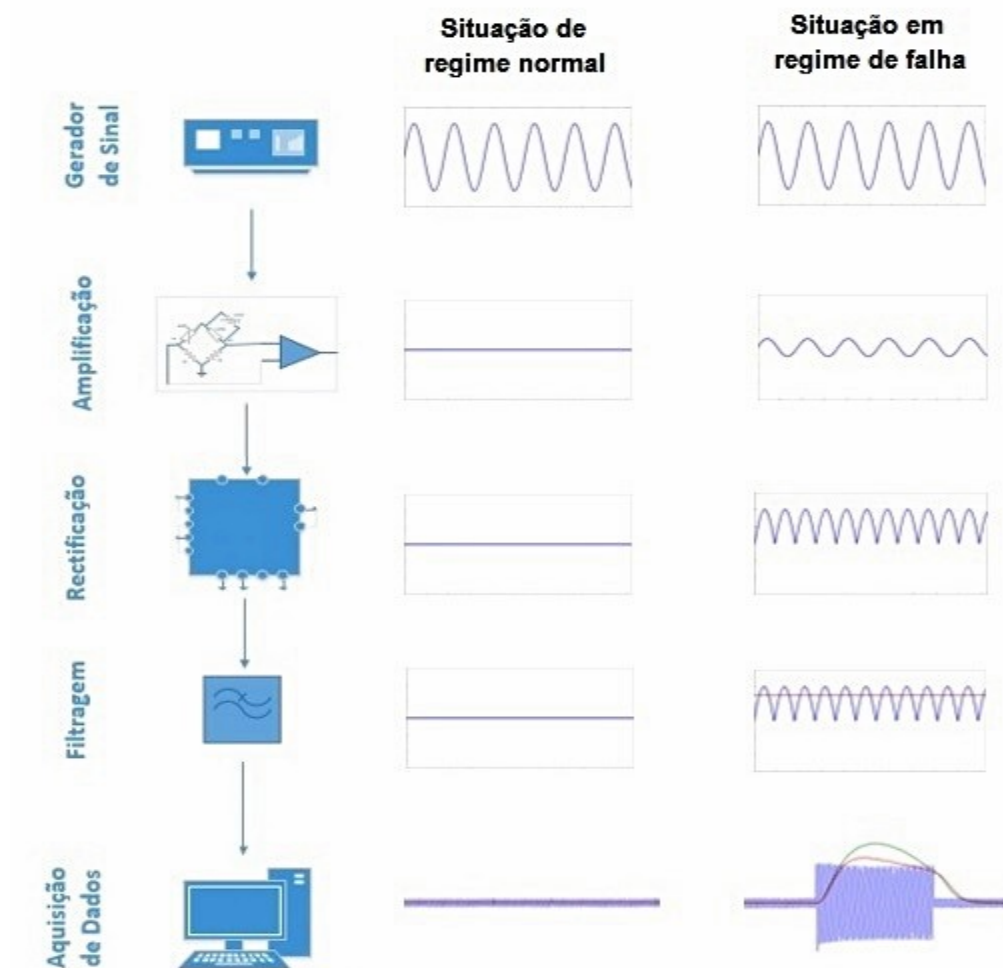


Figura 3.17: Diagrama representativo do processamento de sinal no caso de haver ou não esforços aplicados à fita supercondutora

Em ambos os casos, consegue-se relacionar o sinal DC de saída com a deformação aplicada através da expressão 3.7. É necessário ter em conta os diferentes ganhos de cada um dos amplificadores utilizados, bem como o facto de filtrarmos uma onda retificada. Todos estes fatores influenciam e estão presentes no cálculo final, que permite avaliar qual a deformação presente na fita supercondutora em regime de falha.

Sabe-se então que a saída aos terminais duma ponte de Wheatstone é dada pela relação:

$$V_o = \frac{V_i}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \quad (3.7)$$

Com V_i , o sinal de excitação da ponte, K o fator do extensómetro e ε a deformação em causa. No entanto, o valor medido é influenciado por todos os componentes presentes na montagem, daí resultar a Eq. 3.8, com G_1 e G_2 os ganhos dos amplificadores e $\frac{2}{\pi}$ o valor inerente à retificação de onda completa.

$$V_o = \frac{V_i}{4} \cdot K \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \varepsilon \Leftrightarrow \varepsilon = \frac{4 \cdot V_{outDC}}{K \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{2}{\pi}} \quad (3.8)$$

Assim, recorrendo à igualdade da Eq. 2.15 e sabendo o valor do coeficiente de elasticidade E_y indicado na Tabela 2.1, é possível calcular o esforço mecânico sentido pela fita supercondutora nas diferentes direções. No entanto, é necessário ter em conta o facto do problema em estudo ser caracterizado por um estado biaxial de tensões. Esta condição faz com que o cálculo da tensão mecânica, não seja tão linear como desejado, visto que a deformação presente na direção radial vai de alguma forma influenciar o valor medido na direção axial e vice-versa. Isto é, como ilustrado nas Fig 2.33 e 2.34, ao ser aplicada uma força longitudinal a um determinado material, existirá uma deformação na direção transversal, e vice-versa. Sendo assim, a tensão mecânica será calculada considerando o seguinte sistema de equações, representando x a direção radial, y a axial e ν o respectivo coeficiente de Poisson.

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E_y}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E_y}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x) \end{cases} \quad (3.9)$$

Os resultados dos ensaios laboratoriais foram calculados através destas equações finais e serão apresentados e analisados no capítulo seguinte.

MEDIÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Para que haja um constante desenvolvimento de novas técnicas e metodologias que ofereçam informação acerca das limitações dos diferentes dispositivos de potência, é necessário uma contínua investigação acerca dos esforços eletromecânicos presentes nestes equipamentos. A extensometria apresentou-se como uma solução no cálculo destas grandezas.

Neste capítulo será exposto o procedimento experimental utilizado para a obtenção dos valores das deformações radiais e axiais, desenvolvidas nas fitas supercondutoras, constituintes do secundário de um LCDS indutivo do tipo transformador.

Foram ainda realizadas simulações de elementos finitos, recorrendo ao programa Flux2D, com o objetivo de perceber o comportamento das densidades de fluxo magnético axial e radial. Todas as dimensões assumidas e parametrizadas neste *software* foram idênticas ao modelo do LCDS utilizado no laboratório.

Também os resultados obtidos durante os ensaios laboratoriais serão, ao longo deste capítulo, expostos e discutidos e as conclusões tiradas.

4.1 Simulações

São vários os *softwares* que utilizam o método de elementos finitos para análise e estudo destes equipamentos. O Flux2D permite a simulação de fenómenos eletrodinâmicos, eletroestáticos e magnéticos. Este programa oferece ferramentas que avaliam o comportamento dos dispositivos na ocorrência de falha, daí ser interessante realizar este estudo com o objetivo de compreender quais os esforços eletromagnéticos presentes.

Primeiramente é realizada uma modelização do problema, onde são definidas as propriedades físicas e dimensões do dispositivo, como se ilustra na Fig. 4.1.

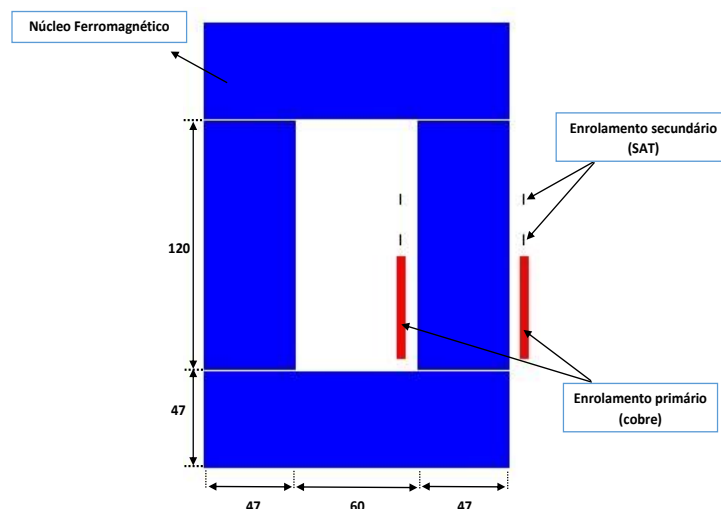


Figura 4.1: Modelo de simulação do LCDS indutivo monofásico

Para que os resultados sejam o mais coerentes possível, as dimensões do modelo utilizado coincidem com as dimensões do protótipo de laboratório. Diferentes especificações são parametrizadas tendo em conta a montagem laboratorial. Alguns destes parâmetros encontram-se na Tab. 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados nas simulações do LCDS

Parâmetro	Valor
Fonte de Alimentação [V_{ef}]	56
Frequência [Hz]	50
Resistência da Linha [Ω]	1
Resistência da Carga [Ω]	59
Resistência Infinita [Ω]	10^{12}
Resistência do Primário [Ω]	0,01
Resistência do Secundário Cobre	0,0061
Resistência do Secundário SC [Ω]	10^{-9}

Definidos os parâmetros é então gerada a respetiva malha de elementos finitos. A segunda fase consiste na resolução do problema recorrendo a ferramentas de cálculo disponibilizadas pelo Flux2D. Esta análise é realizada tendo em conta o pior caso, ou seja, no instante em que a corrente de curto circuito apresenta o seu máximo valor.

Por último, os resultados obtidos são interpretados através de ferramentas de processamento gráfico, permitindo uma inspeção pontual do problema.

Foi então analisado o comportamento das densidades de fluxo magnético radial e axial, as quais serão apresentadas na secção 4.4 juntamente com os resultados obtidos durante os ensaios laboratoriais.

4.2 Procedimento experimental

Nesta secção descreve-se o procedimento para obter os valores das tensões mecânicas. Na Fig. 4.2 está representada esquematicamente a montagem utilizada.

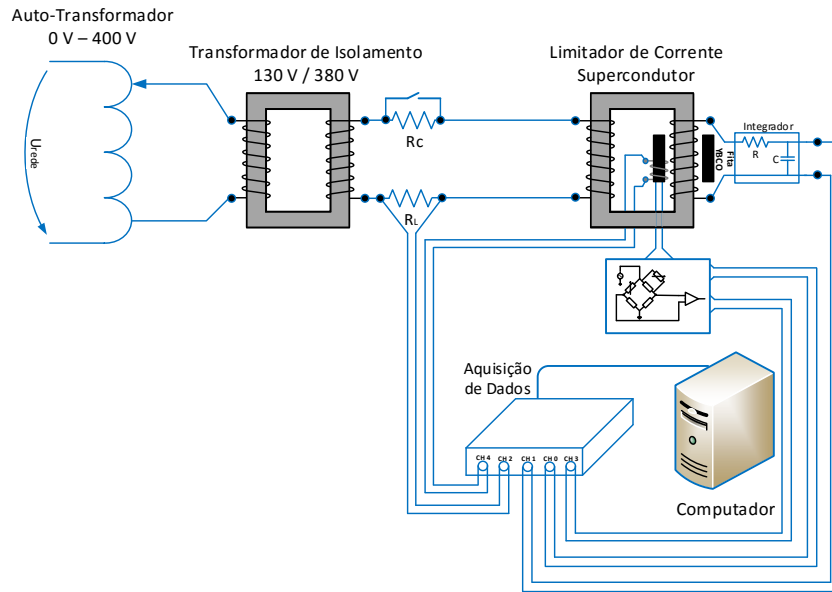


Figura 4.2: Esquema ilustrativo da montagem utilizada nos ensaios laboratoriais (adaptado de [3])

A função dos vários equipamentos usados encontra-se a seguir descrita sumariamente:

- ⇒ **Auto -Transformador 0 V – 400 V:** Utilizado para produzir uma tensão variável aos terminais do transformador de isolamento.
- ⇒ **Transformador de Isolamento:** Garante isolamento galvânico de modo a evitar as correntes de fuga na montagem experimental.
- ⇒ **LCDS indutivo do tipo transformador:** Dispositivo de potência a ensaiar, constituído por um primário com 60 espiras e por um secundário em fita supercondutora com 1 ou 2 espiras dependendo da configuração utilizada.
- ⇒ **Resistência de Linha R_L :** Permite a medição, de modo indireto, da corrente na linha. $R_L = 1 \, \Omega$.
- ⇒ **Integrador:** Integra a tensão aos terminais do secundário do LCDS com o objetivo de medir o fluxo no núcleo.
- ⇒ **Interruptor S_1 :** permite estabelecer curtos-circuitos na rede, curto-circuitando a carga.
- ⇒ **Multímetros:** utilizados para medir a corrente de linha e a tensão de alimentação do circuito.

- ⇒ **Circuito elétrico:** essencial no processo, tratamento e recolha do sinal das tensões referentes às deformações.
- ⇒ **Placa NI-6008:** necessária para adquirir diferentes grandezas recorrendo a seis dos seus canais.
- ⇒ **Computador:** utilizando *software* adequado permite receber e tratar os dados provenientes da placa de aquisição.

A montagem utilizada requer um procedimento faseado e que deve ser cumprido visando a segurança e sucesso do ensaio laboratorial. Inicialmente há necessidade de equilibrar a Ponte de Wheatstone com o objetivo de se obter uma tensão nula aos seus terminais. A leitura nem sempre se apresenta neste valor, devido principalmente à diferença de temperatura e ao facto de o extensómetro estar colado na fita já com algum ângulo que resulta numa deformação. No entanto para melhorar a fiabilidade dos resultados, regula-se manualmente o potenciómetro R_{POT} , presente na Ponte de Wheatstone, de modo a alcançar o equilíbrio deste circuito.

Alcançadas estas condições, é estipulada e regulada a tensão de alimentação do circuito, anteriormente calculada como 80 V ($56 V_{ef}$), de modo a garantir que não se ultrapasse o valor da corrente máxima admitida pelas fitas supercondutoras. Posto isto, inicia-se a gravação e recolha dos dados antes de ser iniciado o curto-circuito para que se consiga ter uma melhor perceção do comportamento dos extensómetros. É então, aplicado um curto-circuito recorrendo ao interruptor S_1 durante um curto intervalo de tempo para que não se ponha em causa a integridade da fita. Após o fim da corrente de curto-circuito aguarda-se, deixando estabilizar o sistema, até uma situação de ausência de esforços, garantindo assim um maior rigor nas medições. Todo este processo permite que exista um estudo quantitativo da presença de deformações em fitas supercondutoras na ocorrência de falhas.

Adquirem-se sinais de cinco dos canais da placa de aquisição de dados, como referido na Tabela 3.1. Os resultados apresentados na secção seguinte contêm os sinais das tensões mecânicas axiais ou radiais, bem como o comportamento da corrente de linha e da corrente na espira medida através da bobina de Rogowski. Para a obtenção de um único valor de deformação, seja ela axial ou radial, é necessário a utilização de um circuito completo como representado na Fig. 3.5. Logo, houve necessidade da montagem de dois destes circuitos de modo a que se conseguisse medir os esforços em ambas as direções.

4.3 Configurações utilizadas para o LCDS

Foram realizados diversos ensaios, todos em regime alternado sinusoidal à frequência de 50 Hz com o objetivo de estudar o maior número de respostas e comportamentos, garantindo uma maior fiabilidade nos resultados obtidos. Várias aplicações em redes de energia

operam com o secundário do limitador constituído por mais do que uma fita supercondutora. Daí, haver necessidade de se realizar um estudo mais abrangente, optando-se por ensaiar o LCDS em duas configurações, analisando posteriormente como se comportam os esforços mecânicos em cada uma das situações. Uma delas com apenas uma fita supercondutora presente no secundário (configuração A) e a segunda utilizando duas espiras do mesmo material (configuração B). Na configuração B, as duas espiras mantêm uma distância de 25 mm entre si. Foi possível analisar diferentes comportamentos, relacionando a distância de cada uma das fitas em relação ao primário, com os esforços mecânicos presentes em cada uma das fitas, de modo a compreender melhor a relação entre eles. Estas configurações estão representadas na Fig. 4.3, sendo que apenas está ilustrada uma coluna do núcleo utilizado.

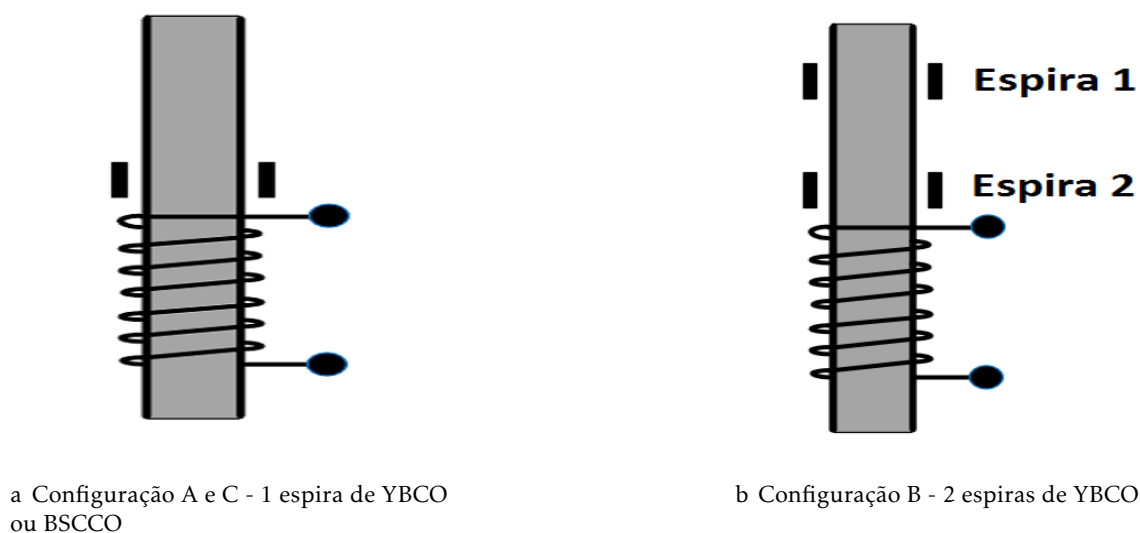


Figura 4.3: Diferentes configurações utilizadas nos ensaios laboratoriais

Para além das fitas supercondutoras de YBCO, também as de primeira geração são estudadas e utilizadas em dispositivos de potência. Assim, serão ainda discutidos e analisados dados referentes ao comportamento de uma fita supercondutora 1G de BSCCO (Configuração C), com o objetivo de comparar os resultados obtidos e concluir acerca do diferente desempenho das duas gerações de fita.

As secções seguintes irão apresentar alguns dos sinais adquiridos e conclusões acerca do problema em estudo.

4.4 Resultados e análise dos esforços eletromecânicos

Tendo em conta os resultados recolhidos dos ensaios laboratoriais pretende-se apresentar e discutir a eficácia do método utilizado e tirar conclusões acerca das medições obtidas. Foram realizados inúmeros ensaios com o objetivo de perceber o real comportamento das fitas e qual a resposta dos extensómetros quando aplicado o curto-circuito. Serão

apresentados resultados em que o número de espiras do secundário é variável, mas as impedâncias de linha e de carga mantêm-se fixas, assim como a tensão da fonte de alimentação, cujo valor foi anteriormente calculado, com base na corrente máxima admitida pela fita supercondutora. Será apenas apresentado um resultado referente a cada uma das configurações, sendo que os restantes ensaios se mostraram concordantes.

4.4.1 Ensaio do LCDS para medição de forças axiais/radiais utilizando 1 espira YBCO - Configuração A

Como ilustrado nas Fig. 3.9 e 3.10 foram aplicados na fita supercondutora dois extensômetros, cada um com a função de medir os esforços aplicados na ocorrência de curto-circuito, tanto na direção axial como radial. Para isso utilizaram-se dois circuitos e recolhidos os sinais de cada um deles. Na Fig 4.4, encontra-se representado o andamento da corrente de linha (a azul), bem como o comportamento das duas tensões mecânicas obtidas. A verde, na direção axial e a vermelho na direção radial.

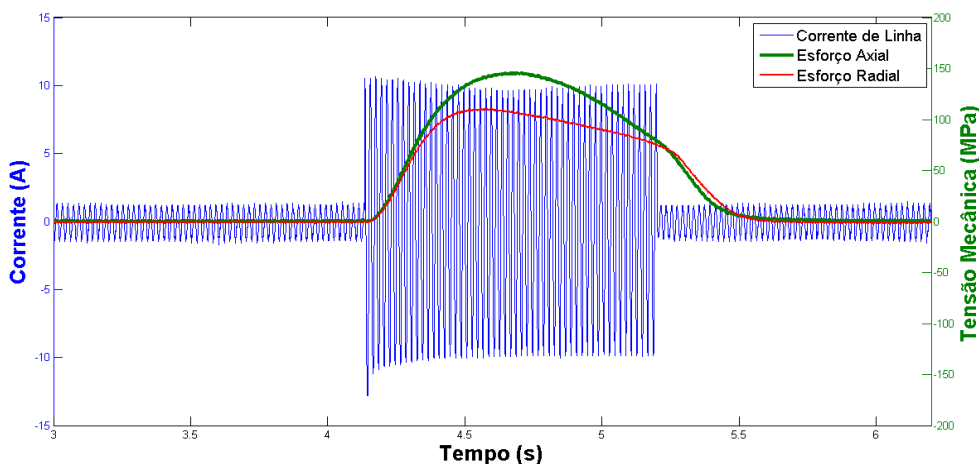


Figura 4.4: Tensão mecânica axial e radial medida em fita supercondutora YBCO e corrente de linha

Como explicado no procedimento experimental, inicialmente é feita a ligação do Auto-Transformador, fazendo com que o o LCDS se encontre em regime normal. Sensivelmente aos 4,15 segundos, recorrendo ao interruptor S_1 , é imposto um curto-circuito à rede. A corrente na linha atinge instantaneamente valores perto dos 10 A, como se verifica na Fig. 4.4, mantendo-se durante todo o curto-circuito ao longo de, sensivelmente, 1 segundo. Nos momentos antecedentes ao curto-circuito o extensómetro não apresenta deformações significativas. Mesmo existindo correntes e campos magnéticos, estes são demasiado baixos para que o extensómetro apresente qualquer tipo de variação na sua resistência, resultando numa linha praticamente nula como ilustrado no gráfico.

Os valores dos esforços presentes no gráfico, após terem sido lidos pela placa de aquisição de dados, foram posteriormente convertidos em Tensão Mecânica (MPa), recorrendo

ao *software* Matlab e às Eq. 3.8 e 3.9. No momento em que é imposto o curto-circuito existe uma deformação sentida por ambos os extensómetros, praticamente no mesmo instante. Valores positivos para o sinal lido permitem concluir que as fitas sofreram forças de extensão em ambas as direções. Ao longo de todos os ensaios conseguiu-se definir um comportamento diferente para cada uma das direções, como se pode aferir através do gráfico apresentado. A tensão sofrida pela fita supercondutora na direção axial, apresenta um aumento inicial dos seus valores até a um máximo que ronda os 145 MPa, começando a diminuir após este valor. No entanto na direção radial as forças mantêm-se mais constantes, sendo que é atingido um máximo perto dos 110 MPa diminuindo gradualmente durante todo o curto-circuito. Esta dinâmica manteve-se coerente ao longo dos ensaios e quando medidas em simultâneo, as forças axiais mostraram ter um valor sensivelmente superior às radiais.

A análise relativamente à comparação dos esforços nas diferentes direções só deve ser tida em conta se os mesmos tiverem sido realizados simultaneamente, visto que apenas devem ser analisados quando submetidos às mesmas circunstâncias. Daí, sempre que as condições eram de alguma forma alteradas, não deviam ser comparados resultados divergentes, pelo que todas estas conclusões foram obtidas através de ensaios onde se medissem nos mesmos instantes, tanto o esforço axial como o radial.

Verifica-se então uma resposta coerente por parte dos extensómetros, tendo em conta que os esforços medidos acompanham, quer no aparecimento do curto-circuito, com consequente aumento do seu valor, como no final deste com respetivo relaxamento até a uma situação de repouso idêntica à inicial.

É necessário ter em conta o facto de estarem presentes deformações mecânicas que não conseguem atingir um tempo de resposta tão elevado quanto o da amplitude da corrente de linha, após o curto-circuito ser aplicado, daí haver um ligeiro atraso até os esforços atingirem o pico máximo. Outro motivo que poderá explicar este atraso na resposta, é o facto do curto-circuito provocar um aumento de temperatura no ambiente onde a espira supercondutora se encontra. Daí, o extensómetro utilizado para compensação de temperatura não se encontra nas mesmas condições do que o colocado na fita, provocando assim algum desequilíbrio na ponte de Wheatstone.

Os valores alcançados nos diversos ensaios não ultrapassaram os 200 MPa, sendo que no presente gráfico, apenas terá sido atingido um máximo de 145 MPa. Analisando a característica da fita de 2ª geração YBCO, presente na Fig. 2.11, observa-se que o limite de elasticidade acontece por volta dos 700 MPa, sendo que a partir deste valor ocorrem danos irreversíveis ao material supercondutor.

Logo, conclui-se que os esforços a que a fita é sujeita nestes ensaios, ficam afastados deste limiar, alcançando no máximo 21% do limite de elasticidade, pelo que a integridade na fita supercondutora não se encontra em risco. Este estudo permite-nos ter uma noção real de quais os esforços a que a fita se encontra submetida durante uma situação de curto-circuito e permitiu aferir que as fitas não apresentam qualquer tipo de deformação plástica, pelo que não existem esforços mecânicos que possam pôr em risco o material em

estudo, para estes valores de corrente.

4.4.2 Ensaio do LCDS para medição de forças axiais utilizando 2 espiras YBCO - Configuração B

Para analisar outras configurações que podem ser usadas em dispositivos LCDS utilizados em redes, decidiu-se recorrer a uma configuração que permitisse perceber como a proximidade do enrolamento primário e consequentes linhas de fluxo magnético poderiam influenciar as forças presentes no secundário, tornando mais versátil e abrangente o estudo realizado. Para isso colocaram-se duas fitas supercondutoras YBCO em dois suportes de Celeron, um deles mais próximo e o segundo mais afastado do enrolamento primário, com o objetivo de analisar os fenômenos aí presentes. Na Fig. 4.5, encontra-se o ilustrado como foi realizado este ensaio.

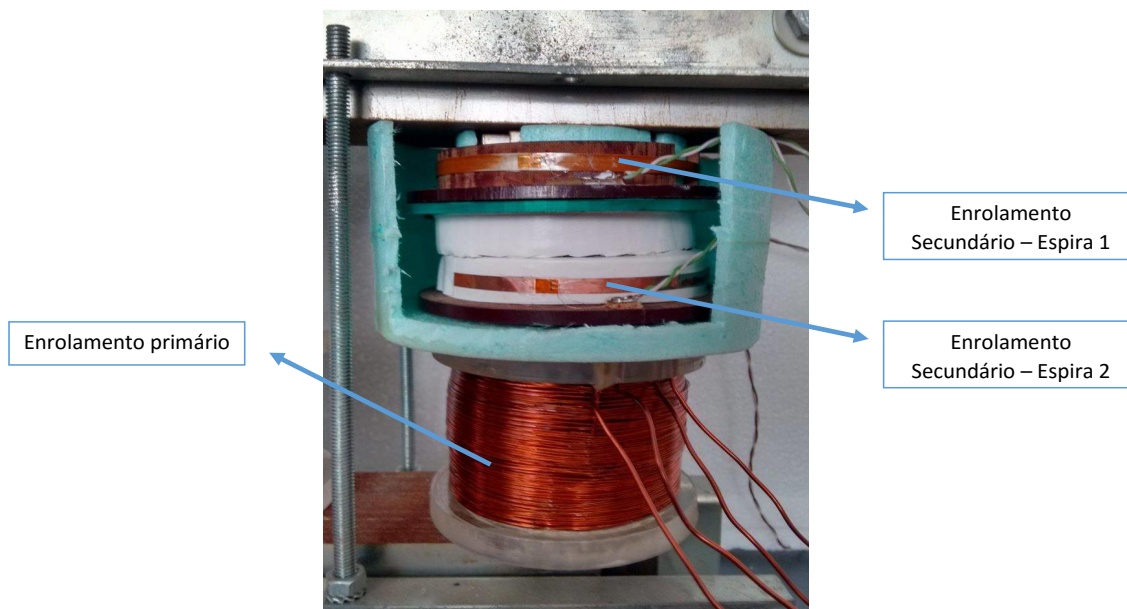


Figura 4.5: Montagem para medição de esforços utilizando 2 espiras YBCO

A espira mais afastada situa-se no topo do criostato, enquanto a outra se encontra no fundo, mais próxima do primário. O comportamento das tensões mecânicas axiais nesta montagem encontra-se representado na Fig. 4.6.

Como se pode observar, o esforço axial continua com o mesmo comportamento, isto é, existe um aumento inicial, quando aplicado o curto-circuito, até se atingir o valor máximo e de seguida uma diminuição até ao momento da ausência da falha, com consequente repouso. O atraso no instante inicial relativamente ao aumento de amplitude da corrente encontra-se justificado na secção anterior.

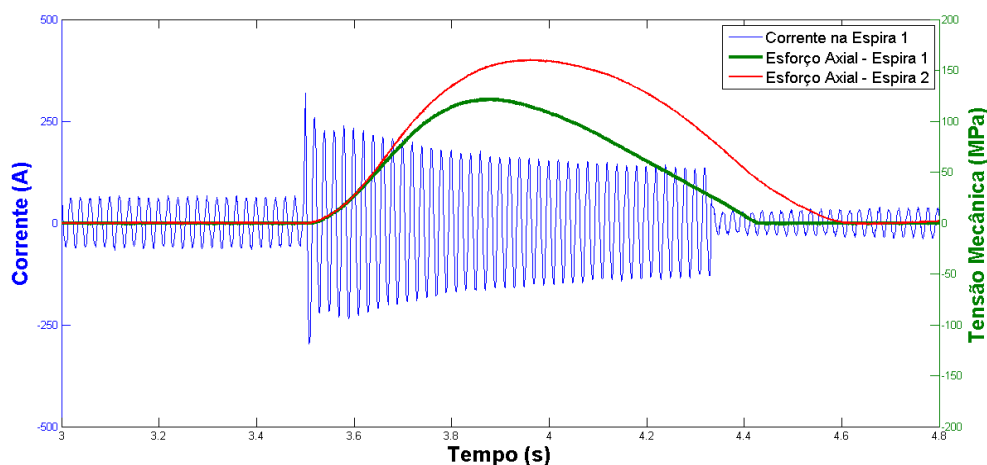


Figura 4.6: Tensão mecânica axial medida em duas fitas supercondutoras de YBCO e corrente na espira 2

Com este ensaio pretende-se perceber de que forma a densidade de fluxo radial resultante da existência de 2 espiras, poderá influenciar os esforços presentes na fita supercondutora. As simulações computacionais demonstram que quanto mais próximo do enrolamento primário, maior valor de densidade de campo de dispersão radial estará presente, pelo que seria de prever uma força axial superior nesta região.

A Fig. 4.6 apresenta, a vermelho, o sinal correspondente ao esforço mecânico axial presente na espira mais próxima do enrolamento primário. O facto da espira estar mais próxima do primário faz com que esta também sinta a presença de densidades de fluxo de dispersão radial provenientes do enrolamento primário, fazendo com que a resultante seja maior nesta configuração. Daí, a tensão mecânica axial ter apresentado valores superiores nesta zona. Mais uma vez os extensómetros ofereceram uma resposta assertiva, reconhecendo as deformações durante a ocorrência da falha e traduzindo um maior esforço, perto dos 160 MPa pela espira colocada na zona de maior densidade de linhas de campo magnético. Por outro lado, a espira que se encontrava mais afastada também ficou sujeita a tensão mecânica como traduzido na Fig. 4.6, pela linha verde. No entanto, e corroborando mais uma vez as simulações, o valor máximo aí alcançado apenas atingiu 120 MPa. Tendo em conta que quanto mais afastado do primário se encontrar a espira, menor a densidade de linhas de fluxo, assume-se coerente o resultado obtido. Na Fig. 4.7 estão ilustradas as densidades de fluxo magnético radial. Sendo a espira 1 mais afastada do primário, e a espira 2 mais próxima.

Verifica-se que o fluxo de dispersão magnético radial é superior na espira mais próxima do primário.

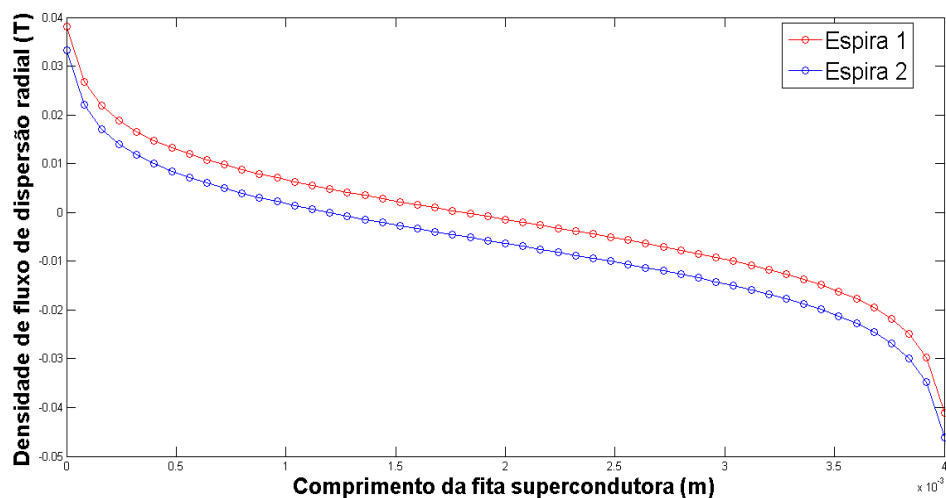


Figura 4.7: Distribuição da densidade de fluxo magnético radial em duas espiras YBCO

Para além da corrente de linha, também um dos canais da placa de aquisição de dados foi utilizado para medir a corrente na espira, através de uma bobina de Rogowski, como ilustrado na Fig. 3.16. Essa grandeza foi processada através de um retificador ativo de ganho ≈ 90 , e posteriormente traduzido através de , resultando no sinal representado a azul na Fig. 4.6. Verifica-se que no instante inicial do curto-circuito há um pico máximo de corrente, alcançando valores próximos de 300 A, havendo posteriormente uma diminuição e comportamento mais estável até ao fim do curto-circuito, rondando valores de 150 A. Também neste caso a gama de valores das tensões mecânicas a que as espiras ficam sujeitas está muito afastada do limiar de deformação plástica da fita de 2ª geração YBCO, representando 23% do limite máximo admitido pela fita sem sofrer deformações irreversíveis.

4.4.3 Ensaio do LCDS para medição de forças radiais utilizando 2 espiras YBCO - Configuração B

Analogamente à secção anterior, utilizando o mesmo método de medida, a montagem foi ensaiada desta vez com o objetivo de obter e analisar o comportamento dos esforços radiais presentes na fita supercondutora. Na Fig. 4.8 encontram-se representadas estas forças, tanto na espira mais próxima, como na mais afastada do primário, bem como a corrente de linha presente durante o curto-circuito, semelhante à ilustrada na Fig. 4.4.

Após análise das simulações efetuadas, verificou-se que a densidade do fluxo de dispersão axial, responsável pela presença destes esforços, apresentava uma configuração idêntica tanto perto, como na espira mais afastada do primário. Isto é, a distribuição de linhas de campo é semelhante em ambas as espiras, como apresentado na Fig. 4.9.

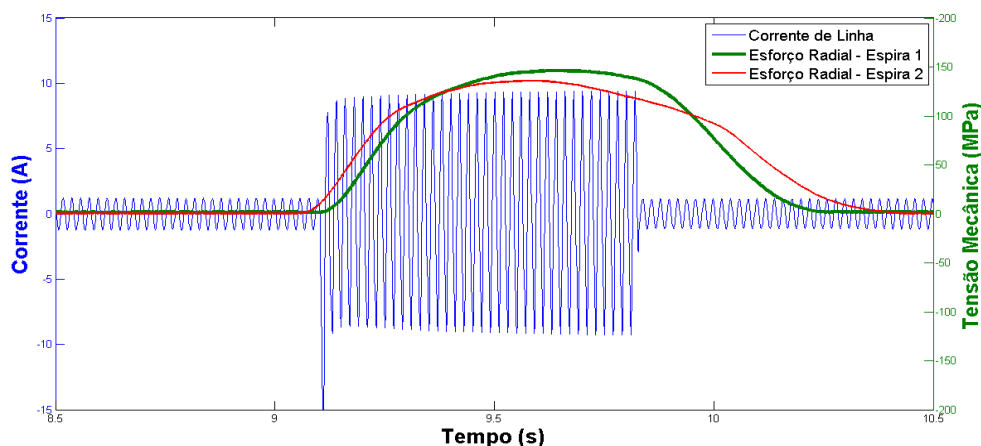


Figura 4.8: Tensão mecânica radial medida em fita supercondutora de BSCCO e corrente de linha

Tendo em conta este comportamento, seria possível prever que os esforços radiais também apresentassem a mesma gama de valores em ambos os casos, visto serem criados por estes campos magnéticos. Analisando a Fig. 4.8 constata-se que o esforço radial, quer na espira 1, quer na espira 2 apresenta um comportamento idêntico. Inicialmente existe um aumento, estabilizando ao longo do curto-circuito e no fim deste, ocorre um relaxamento até a uma situação onde as deformações são mínimas, sendo imperceptíveis face ao método de medida. Ainda é possível analisar-se que tanto na espira mais próxima do enrolamento primário, como na mais afastada, os esforços valem cerca de 140 MPa em ambos os casos, 20% do limite de elasticidade.

Na Fig. 4.8, encontra-se ainda representada a corrente de linha que se mantém mais uma vez perto dos 10 A, como foi inicialmente dimensionada.

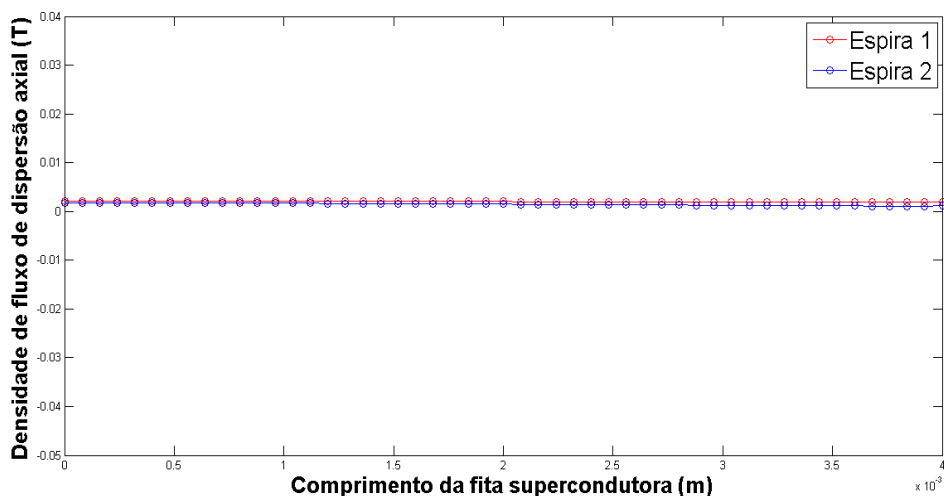


Figura 4.9: Distribuição da densidade de fluxo magnético axial em duas espiras YBCO

Diferentes ensaios foram realizados e o comportamento dos esforços radiais mostrou-se idêntico ao ilustrado na Fig.4.8, concluindo-se mais uma vez um bom desempenho por parte dos extensômetros e do processamento e aquisição do sinal.

4.4.4 Ensaio do LCDS para medição de forças axiais/radiais utilizando 1 espira BSCCO - Configuração C

Para além do estudo de esforços mecânicos em fitas supercondutoras de 2ª geração, resolveu-se realizar alguns ensaios utilizando fitas de 1ª geração, mais propriamente Bi-2223. Os ensaios envolvendo este diferente tipo de fitas foram realizados tendo em conta o mesmo método e montagem anteriores. A Fig. 4.10 ilustra a resposta da fita supercondutora BSCCO na ocorrência de corrente de curto-circuito, apresentado os respetivos esforços, bem como a corrente presente na linha.

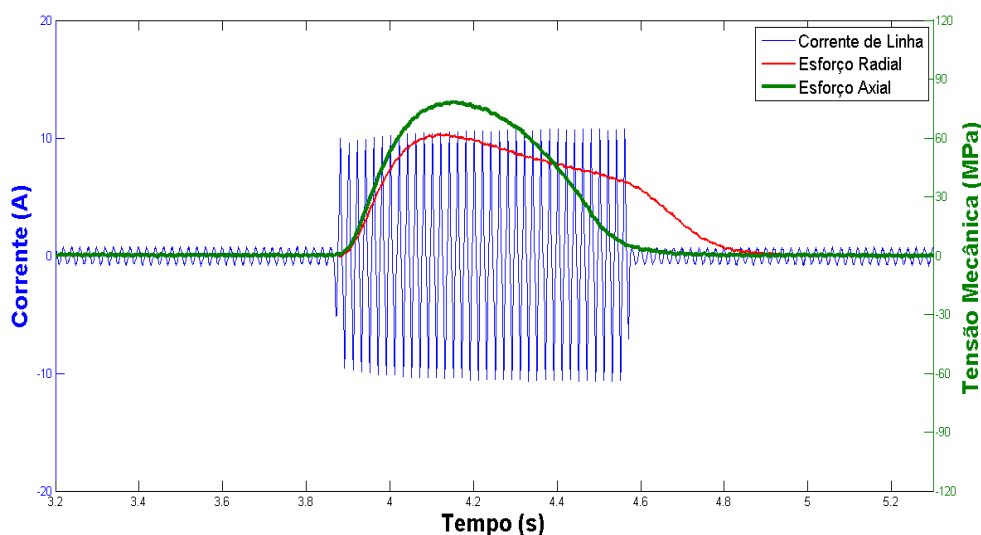


Figura 4.10: Tensão mecânica axial e radial medida em fita supercondutora de BSCCO e corrente de linha

Pode observar-se na Fig. 4.10 que perto dos 3,9 segundos dá-se o início do curto-circuito, apresentando valor de corrente de linha perto dos 10 A. Também aqui, os extensômetros conseguiram detectar as deformações durante a falha, apesar do desfaseamento inicial anteriormente explicado. O esforço radial aumenta e estabiliza até ao momento em que o interruptor S_1 é desligado, verificando-se também o alcance do valor máximo e consequente diminuição, por parte da tensão mecânica axial. São verificadas ainda deformações de tração em ambas as direções, caracterizadas pelo sinal positivo da deformação obtida.

No entanto, um aspecto interessante é o facto dos valores dos esforços presentes na fita serem inferiores, ou seja, constata-se através da análise do gráfico que na direção axial é alcançado um valor perto dos 85 MPa, enquanto na direção radial, o máximo é cerca

de 60 MPa. Este comportamento é facilmente justificável analisando a Fig. 2.10, onde a reta A representa fita supercondutora de BSCCO e a reta G uma fita de 2ª geração de YBCO. Verifica-se que para uma mesma tensão mecânica, a deformação no material de 1G é menor, o que corrobora mais uma vez os resultados obtidos. Ainda é possível observar que as propriedades mecânicas destas fitas, comparativamente às de 2G, apresentam limites de elasticidade e resposta a deformações menores. Também o facto das fitas de 1G apresentarem densidades de corrente menores que as de 2ª geração, tendo em conta a Eq. 2.4, seria espectável que a grandeza das tensões mecânicas nesta situação fosse menor.

Outro aspecto a ter em conta é o limiar de deformação elástica ilustrado na característica da fita Bi-2223. O seu valor situa-se perto dos 300 MPa, muito menor, que as fitas de 2G. No entanto, como se pôde observar na Fig. 4.10, os esforços a que a fita de BSCCO esteve submetida durante o curto-circuito, ficaram também afastados do limite de elasticidade, apresentando o valor máximo 28% deste limite, não comprometendo então a integridade do material em estudo, pondo de parte a possibilidade de qualquer tipo de dano irreversível causado durante os ensaios.

4.5 Conclusão

Neste capítulo, primeiramente, foram enunciados quais os elementos presentes na montagem laboratorial juntamente com a sua função e objetivo, bem como a descrição sucinta do procedimento experimental e das particularidades das condições em que se realizaram os ensaios.

Foram apresentados os resultados obtidos relativamente aos esforços axiais e radiais a que as fitas supercondutoras se encontram submetidas na ocorrência de falha, neste caso, uma corrente de curto-circuito. Também a corrente de linha foi medida e analisada, sendo que em particular para a fita de 2ª geração YBCO, mediu-se também a corrente na espira, recorrendo à utilização de uma bobina de Rogowski.

Com base nos valores obtidos, avaliou-se o desempenho do método aplicado e a viabilidade da solução apresentada, em termos de resposta e medição por parte da extensometria.

Há que ter em atenção o facto de ter sido ensaiado um protótipo de pequena escala de um LCDS. Os dispositivos presentes na rede de energia, na ocorrência de falha, apresentam correntes de CC bastante superiores às aqui estudadas. No entanto, ao ser utilizada o mesmo modelo de fita supercondutora, espera-se que na ocorrência de falha, a corrente na espira seja idêntica, sendo possível inferir que os esforços mecânicos presentes estejam afastados do limiar de elasticidade, não pondo em risco a integridade do equipamento.

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Após realização do projeto apresentado, para além de ser necessário fazer uma avaliação final do desempenho do mesmo, tecendo conclusões acerca dos resultados obtidos, há que propor novas metodologias que possam ser desenvolvidas no futuro com o intuito de melhorar a versatilidade dos ensaios realizados. Durante os ensaios laboratoriais foi utilizado um protótipo de LCDS indutivo do tipo transformador, em que o seu secundário é constituído por fitas supercondutoras, quer de BSCCO (1G), quer de YBCO (2G). O dispositivo em estudo foi submetido a correntes de curto-circuito (falhas), com o objetivo de estudar quais os esforços eletromecânicos a que as fitas supercondutoras ficam sujeitas, recorrendo para tal à extensometria. Por último, para que se pudesse corroborar e garantir uma maior fiabilidade dos resultados obtidos experimentalmente, foram realizadas simulações usando o método dos elementos finitos.

5.1 Conclusões gerais

O trabalho desenvolvido oferece uma visão do comportamento das fitas supercondutoras quando submetidas a correntes de curto-circuito. Os resultados obtidos representam as deformações que estes materiais sofrem na presença de campos magnéticos proveniente de um aumento da corrente na ocorrência da falha. Estas forças, podem originar problemas nos dispositivos de potência, comprometendo o funcionamento correto das redes de energia, podendo, no limite, pôr em risco a integridade destes equipamentos. Houve necessidade de estudar um método que pudesse responder a este problema, fornecendo informação acerca destes fenómenos eletromecânicos. Como solução, foram utilizados extensómetros, montados de modo a que permitissem realizar este tipo de medições, juntamente com um circuito elétrico previamente dimensionado, de maneira a processar e tratar os dados dos respetivos sinais.

Foram então medidos os esforços na direção axial e na direção radial presente nas fitas supercondutoras. Verificaram-se, como seria de esperar, forças durante o curto-circuito. Na direção axial, em fitas supercondutoras de segunda geração, foram atingidos os 145 MPa, enquanto que na direção radial a tensão mecânica rondou os 110 MPa. A primeira demora mais tempo a atingir o seu valor máximo, apresentando uma diminuição até final do curto-circuito, enquanto que as radiais atingem o seu pico mais rapidamente, decrescendo lentamente até à ausência de falha. Este comportamento das tensões mecânicas foi idêntico em todos os ensaios realizados, havendo apenas pequenas variações no valor dos esforços, encontrando-se no entanto sempre nesta ordem de grandeza.

Para além deste estudo foram realizados ensaios em que o secundário do LCDS apresentava uma configuração diferente, constituído nestes casos por duas fitas supercondutoras de 2ª geração, YBCO. Também a fita supercondutora de 1ª geração BSCCO foi ensaiada, apresentando valores máximos de esforço axial e radial de 85 MPa e 60 MPa, respetivamente. Em todos os ensaios realizados, os esforços obtidos encontram-se na zona de deformação elástica do material, longe do limite de elasticidade. Nas fitas 2G os valores máximos de tensão mecânica alcançaram 23% deste limite e as de 1ª geração 28%, pelo que, nenhum dos ensaios colocou em risco a integridade das fitas supercondutoras. Relativamente às simulações de elementos finitos, existem ainda algumas discrepâncias nos valores das forças aplicadas, quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente. Esta diferença pode ser explicada pelo facto das simulações serem realizadas em ambiente 2D, o que faz com que os cálculos sejam feitos tendo em conta uma aproximação das dimensões do modelo existente.

No entanto, pode comprovar-se um bom desempenho por parte do método aplicado, demonstrando uma boa resposta por parte dos extensómetros, tornando esta solução como uma opção viável no estudo de esforços mecânicos presentes em fitas supercondutoras, possibilitando uma medição das tensões a que se encontram submetidas, podendo este conhecimento ser utilizado na prevenção de possíveis danos.

Na secção seguinte serão apresentadas propostas e sugestões que possam melhorar e otimizar a metodologia aplicada.

5.2 Trabalho futuro

Tendo sido este método uma primeira abordagem à medição das tensões mecânicas num dispositivo de potência constituído por fitas supercondutoras, há necessidade de propor novos estudos e metodologias para que se possa avaliar, o desempenho da extensometria. Assim, numa perspectiva de trabalhos futuros, sugere-se o ensaio em regime de falha de outros tipos de LCDS, com o intuito de se perceber que topologia poderá dar origem a maiores esforços e em que condições poderá estar condicionada a integridade física destes materiais. Deve ser ainda necessário ter em conta o desenvolvimento deste método, ensaiando limitadores de corrente trifásicos, visto serem estes que apresentam maior interesse em aplicações de energia, possibilitando previsões fundamentais do desempenho

dinâmico destes equipamentos quando instalados em redes elétricas.

Para além das configurações estudadas durante os ensaios laboratoriais, propõe-se ainda que também se realizem ensaios, podendo haver ainda uma maior variedade no número de espiras presentes. Ainda as configurações utilizando espiras concêntricas poderão também ser um importante factor de estudo. Todas estas configurações terão como objetivo estudar e observar o comportamento das tensões mecânicas radiais e axiais presentes nas fitas supercondutoras.

Foi descrito na secção 3.2 o circuito elétrico utilizado para obtenção dos valores destes esforços, bem como todo o processamento e aquisição de sinal adjacente à montagem presente na Fig. 3.5. Apesar do bom desempenho por parte dos extensómetros, há que ponderar melhorias que poderão de alguma forma otimizar os resultados obtidos. Poderá então, em trabalhos futuros, ser utilizada uma configuração de Ponte de Wheatstone completa, em que todos os braços são constituídos por extensómetros, permitindo uma atenuação do ruído e aumento a sensibilidade das medições. Ainda será importante desenvolver uma placa de circuitos impressos, visto que no âmbito da microeletrónica, esta tecnologia oferece um melhor processamento de sinal, atenuando grande parte do ruído inerente às ligações que se apresentam, neste caso, na placa de ensaio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Van Delft e P. Kes. “The discovery of superconductivity”. Em: *Physics Today* 63.9 (2010), p. 38.
- [2] H. K. Onnes. “Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden. Suppl. 29”. Em: (Nov. 1911).
- [3] P. M. L. Arsénio. “Desenvolvimento e análise de um limitador de corrente indutivo baseado em fita supercondutora Bi-2223”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012.
- [4] J. C. Gallop. *SQUIDS, The Josephson effects and superconducting electronics*. CRC Press, 1991.
- [5] N. M. G. Vilhena. “Construção e ensaio de um limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012.
- [6] A. M. G. Pronto. “Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura”. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- [7] J. G. Bednorz e K. A. Müller. “Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”. Em: *Ten Years of Superconductivity: 1980–1990*. Springer, 1986, pp. 267–271.
- [8] M.-K. Wu, J. R. Ashburn, C. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Wang e a. Chu. “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure”. Em: *Physical Review Letters* 58.9 (1987), p. 908.
- [9] “<http://www.supraconductivite.fr> , consultado em 7 de Dezembro de 2015”.
- [10] H. W. Weijers. “High-temperature superconductors in high-field magnets”. Tese de doutoramento. University of Twente, 2009.
- [11] D Hazelton. “Application of SuperPower 2G HTS Wire to High Field Devices”. Em: *22nd Int. Conf. Magnet Technology, Marseille, France*. 2011.
- [12] M. Noe e M. Steurer. “High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status”. Em: *Superconductor Science and Technology* 20.3 (2007), R15.

- [13] J. Bock, F. Breuer, H. Walter, S. Elschner, M. Kleimaier, R. Kreutz e M. Noe. "CURL 10: development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-BSCCO 2212". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 15.2 (2005), pp. 1955–1960.
- [14] A Hobl, W. Goldacker, B. Dutoit, L. Martini, A. Petermann e P. Tixador. "Design and production of the ECCOFLOW resistive fault current limiter". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 23.3 (2013), pp. 5601804–5601804.
- [15] H Dersch. "Inductive current limitation device for an alternating current using the superconductivity superconductor". Em: *European Patent Specification* 353449 (1990).
- [16] M. M. Aly e E. A. Mohamed. "Comparison between resistive and inductive superconducting fault current limiters for fault current limiting". Em: *Computer Engineering & Systems (ICCES), 2012 Seventh International Conference on*. IEEE. 2012, pp. 227–232.
- [17] W Paul, M Lakner, J Rhyner, P Unternährer, T. Baumann, M Chen, L Widenhorn e A Guerig. "Test of 1.2 MVA high-superconducting fault current limiter". Em: *Superconductor Science and Technology* 10.12 (1997), p. 914.
- [18] H Kado e M Ickikawa. "Performance of a high-Tc superconducting fault current limiter-design of a 6.6 kV magnetic shielding type superconducting fault current limiter". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 7.2 (1997), pp. 993–996.
- [19] M Majoros, L Jansak, S Sello e S Zannella. "Transient analysis of HTS inductive fault current limiter". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 7.2 (1997), pp. 989–992.
- [20] Y. Shirai, S. Noda, K. Yamabe, K. Hattori, J. Baba, T. Nishihara, T. Nitta, S. Kobayashi e K. Sato. "Current limiting performance of three-phase concentric transformer type SFCL at unbalanced fault conditions". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 23.3 (2013), pp. 5601905–5601905.
- [21] F. D. A. N. F. Moriconi F. De La Rosa e L. Masur. "Development and deployment of saturated-core fault current limiters in distribution and transmission substations". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 21.3 (2011), pp. 1288–1293.
- [22] E Muljadi, V Gevorgian e F DeLaRosa. "Wind power plant enhancement with a fault current limiter". Em: *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. IEEE. 2011, pp. 1–7.
- [23] J. M. M. Pina. "Desenho e modelização de sistemas de energia empregando materiais supercondutores de alta temperatura". Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.

-
- [24] C. W. G. 12.19. *The Short Circuit Performance of Power Transformers*. CIGRE Technical Brochure 209. 2002.
- [25] A. C. de AZEVEDO, A. Delaiba, J. C. de OLIVEIRA, B. Carvalho e H. d. S. Bronzeado. "Transformer mechanical stress caused by external short-circuit: a time domain approach". Em: *International Conference on Power Systems Transients*. 2007.
- [26] M. Waters. *The short-circuit strength of power transformers*. Macdonald, 1966.
- [27] E. Bjerkan. "High frequency modeling of power transformers: stresses and diagnostics". Em: (2005).
- [28] P. Boss, T. Horst, P. Lorin, K. Pfammatter, A. Fazlagic e M. Perkins. "Life assessment of power transformers to prepare a rehabilitation based on a technical-economical analysis". Em: *CIGRE Session*. 2002, pp. 12–106.
- [29] W. McNutt, W. Johnson, R. Nelson e R. Ayers. "Power Transformen Short-Circuit Strength-Requirements, Design, and Demonstration". Em: *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* 8 (1970), pp. 1955–1969.
- [30] B. García, J. C. Burgos e Á. Alonso. "Winding deformations detection in power transformers by tank vibrations monitoring". Em: *Electric power systems research* 74.1 (2005), pp. 129–138.
- [31] E. R. de Aguiar. "Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência". Em: (2007).
- [32] M. Heathcote. *J & P transformer book*. Newnes, 2011.
- [33] A. T. Cabrera. "Estudo das forças electrodinâmicas desenvolvidas em limitadores de corrente supercondutores". Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2014.
- [34] R. Junior e A. J. Pereira. "Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico". Em: (2010).
- [35] http://www.kyowa-ei.com/eng/technical/strain_gages/index.html, consultado a 19 de Maio de 2015.
- [36] J. Kosse. "Critical current degradation in rebco and BI-2223 superconductors under torsional and tensile strain". Em: (2013).
- [37] M. A. Meyers e K. K. Chawla. *Mechanical behavior of materials*. Vol. 2. Cambridge university press Cambridge, 2009.
- [38] S. Ekelöf. "The genesis of the Wheatstone bridge". Em: *Engineering Science and Education Journal* 10.1 (2001), pp. 37–40.
- [39] P. Sunwong, J. S. Higgins e D. P. Hampshire. "Angular, temperature, and strain dependencies of the critical current of DI-BSCCO tapes in high magnetic fields". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 21.3 (2011), pp. 2840–2844.

- [40] H. Hamid e D. Hampshire. "Critical current density of superconductors as a function of strain in high magnetic fields". Em: *Cryogenics* 38.10 (1998), pp. 1007–1015.
- [41] K. Osamura, S. Machiya, D. P. Hampshire, Y. Tsuchiya, T. Shobu, K. Kajiwara, G. Osabe, K. Yamazaki, Y. Yamada e J. Fujikami. "Uniaxial strain dependence of the critical current of DI-BSCCO tapes". Em: *Superconductor Science and Technology* 27.8 (2014), p. 085005.
- [42] H. Shin, J. Dizon, R. Ko, T. Kim, D. Ha e S. Oh. "Reversible tensile strain dependence of the critical current in YBCO coated conductor tapes". Em: *Physica C: Superconductivity* 463 (2007), pp. 736–741.
- [43] S Bamba, Y Tanaka, T Ando, H Ueda, A Ishiyama, Y Yamada e Y Shiohara. "Fatigue tests of YBCO coated conductors". Em: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 97. 1. IOP Publishing, 2008, p. 012170.
- [44] T. Takao, T. Iwamura, Y. Fukasawa, S. Minowa, H. Sato, T. Asano, A. Ishiyama, J. Kato, T. Machi, K. Nakao et al. "Influence of bending and torsion strains on critical currents in YBCO coated conductors". Em: *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* 17.2 (2007), pp. 3513–3516.
- [45] D. Van der Laan e J. Ekin. "Dependence of the critical current of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors on in-plane bending". Em: *Superconductor Science and Technology* 21.11 (2008), p. 115002.
- [46] M Sugano, K Shikimachi, N Hirano e S Nagaya. "Simultaneously bending and tensile strain effect on critical current in YBCO coated conductors". Em: *Physica C: Superconductivity* 463 (2007), pp. 742–746.
- [47] C. Kitchin e L. Counts. *A designer's guide to instrumentation amplifiers*. Analog Devices, 2006.
- [48] A. Devices. *AD630 Balanced Modulator/Demodulator*. 2004.